

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta strojní**  
**Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení**

**Projekční návrhy axiálních hydrostatických ložisek**

Design Projects of Axial Hydrostatic Bearings

**Student:**

**Bc. Michal Kozdera**

**Vedoucí diplomové práce:**

**Ing. Marian Bojko, Ph.D.**

**Ostrava 2010**

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

FAKULTA STROJNÍ

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

**Projekční návrhy axiálních hydrostatických ložisek**

*Design Projects of Axial Hydrostatic Bearings*

Student: **Bc. Michal Kozdera**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 3909T001 Konstrukční a procesní inženýrství  
Specializace: 16 Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení

**Vedoucí diplomové práce:** Ing. Marian Bojko, Ph.D.  
**Konzultant diplomové práce:** Dr. Ing. Miroslav Bova  
**Datum zadání diplomové práce:** 18. Prosince 2009  
**Akademický rok:** 2009/2010

.....  
**doc. RNDr. Milada Kozubková, CSc.**

.....  
**prof. Ing. Radim Farana, CSc.**

V Ostravě dne 18. Prosince 2009

### **Místopřísežné prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě .....

.....

podpis studenta

### **Prohlašuji, že**

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Michal Kozdera  
Engelmüllerova 3035/14  
Ostrava

V Ostravě :.....

.....  
podpis

## **ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE**

KOZDERA, M. *Projekční návrhy axiálních hydrostatických ložisek: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2010, 77 s. Vedoucí práce: Bojko, M.

Diplomová práce se zabývá návrhem axiálního hydrostatického ložiska, které patří mezi kluzná ložiska. Tyto ložiska vytvářejí nosnou vrstvu oleje mezi dvěma kluznými plochami pomocí externího zdroje tlaku. Ložisko je součástí otočného stolu frézky DF 4600 CNC, která slouží k obrábění klikové hřídele používané u dvoutaktních spalovacích motorů na lodích. Cílem práce je definování matematického modelu proudění v úzké mezeře pomocí CFD programu Fluent a následnou aplikací na axiálním hydrostatickém ložisku. Na základě výsledného tlakového a rychlostního pole ve fluidní vrstvě budou provedeny konstrukční úpravy geometrie ložiska.

## **ANNOTATION OF THESIS**

KOZDERA, M. *Design Project of Axial Hydrostatic Bearings: Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Hydromechanics and Hydraulic Equipments, 2010, 77 p. Thesis head: Bojko, M.

The thesis focuses on designing axial hydrostatic bearing, which belongs to a group of plain bearings. These produce oil bearing layer between two sliding surfaces with external pressure source. The bearing is a part of a turntable of the milling machine CNC 4600 DF, which is used for machining processing crankshafts used for two-stroke combustion engine on the boats. The aim of the thesis is to define mathematical model of flow in narrow gap with the assistance CFD program Fluent and the subsequent application of axial hydrostatic bearing. Based on the resulting pressure and velocity field in fluidized bed, there will be structural adjustments of bearing geometry made.

# Obsah

SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ.....	8
1 ÚVOD.....	10
2 CHARAKTERISTIKA KLUZNÝCH LOŽISEK A JEJICH ROZDĚLENÍ .....	11
2.1 Parametry pro volbu kluzného ložiska.....	13
2.2 Tření kluzných ložisek .....	16
2.2.1 Smíšené a suché tření.....	17
2.2.2 Geometrie třecích ploch.....	18
2.2.3 Kapalné tření.....	18
2.3 Axiální hydrostatická ložiska.....	20
3 TECHNICKÝ POPIS PRACOVNÍHO STROJE DF 4600 CNC.....	23
3.1 Hydraulický agregát axiálního hydrostatického ložiska .....	25
3.2 Vlastnosti pracovní kapaliny.....	27
4 TEORIE PROUDĚNÍ V ÚZKÉ MEZEŘE .....	28
4.1 Základní rovnice proudění skutečné kapaliny.....	29
4.2 Laminární proudění v úzké mezeře.....	30
5 TVORBA GEOMETRIE A VÝPOČTOVÉ SÍTĚ .....	32
5.1 Charakteristika programového systému Gambit .....	33
5.2 Výpočetní síť 3D modelu axiálního hydrostatického ložiska .....	34
5.2.1 Vytvoření sítě axiálního hydrostatického ložiska.....	36
6 MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ V ÚZKÉ MEZEŘE AXIÁLNÍHO HYDROSTATICKEHO LOŽISKA .....	37
6.1 Charakteristika programového systému Fluent .....	37
6.2 Definování matematického modelu axiálního hydrostatického ložiska.....	39

6.3	Definování okrajových podmínek.....	39
6.4	Konstrukční návrhy axiálního hydrostatického ložiska .....	41
7	APLIKACE MATEMATICKÉHO MODELU NA AXIÁLNÍ HYDROSTATICKÉ LOŽISKO .....	42
7.1	VARIANTA 1 .....	42
7.2	VARIANTA 2 .....	43
7.3	VARIANTA 3 .....	48
7.4	VARIANTA 4 .....	49
7.5	VARIANTA 5 .....	53
7.6	VARIANTA 6 .....	56
7.7	VARIANTA 7 .....	58
8	ZÁVĚR .....	63
9	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	67
10	SEZNAM PŘÍLOH.....	68

## SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ

OZNAČENÍ	NÁZEV	ROZMĚR
$C_1, C_2$	konstanta	[1]
$F$	zátěžná síla	[N]
$F_t$	třecí síla	[N]
$O$	obvod	[m]
$Q_m$	hmotnostní průtok	[kg.s <sup>-1</sup> ]
$Q_v$	objemový průtok	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]
Re	Reynoldsovo číslo	[1]
$S$	plocha	[m <sup>2</sup> ]
$T$	teplota	[K]
$a_0$	vnější zrychlení	[m.s <sup>-2</sup> ]
$b$	rozměr ložiska	[m]
$d$	charakteristický rozměr	[m]
$g$	tíhové zrychlení	[m.s <sup>-2</sup> ]
$h$	tloušťka mezery	[m]
$l$	rozměr	[m]
$n$	otáčky	[s <sup>-1</sup> ]
$p$	tlak	[Pa]
$p_0$	konstantní tlak	[Pa]
$p_1$	tlak v ložisku	[Pa]
$p_2$	výstupní tlak	[Pa]
$q$	laminární průsak kapaliny	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]
$t$	čas	[s]
$u$	unášivá, obvodová rychlost	[m.s <sup>-1</sup> ]
$u_{MAX}$	maximální rychlost	[m.s <sup>-1</sup> ]
$u_{MIN}$	minimální rychlost	[m.s <sup>-1</sup> ]
$u_S$	střední rychlost	[m.s <sup>-1</sup> ]
$v$	rychlost, relativní rychlost	[m.s <sup>-1</sup> ]
$x_i$	souřadnice v kartézském systému [ $x_1, x_2, x_3$ ] nebo [ $x, y, z$ ]	



$\Delta$	Laplaceův operátor	[1]
$\eta$	dynamická viskozita	[Pa.s]
$\lambda$	stupeň zatížení	[1]
$\mu$	součinitel tření	[1]
$\nu$	kinetická viskozita	[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
$\pi$	Ludolfovo číslo	[1]
$\rho$	hustota	[kg.m <sup>-3</sup> ]
$\tau$	tečné napětí	[Pa]
$\omega$	úhlová rychlost	[s <sup>-1</sup> ]

#### ZNAČENÍ VE SCHÉMATU (obr. 3.2)

AXL	axiální hydrostatické ložisko
M	motor
ODV	otočná deska vřeteníku
OV	ozubený věnec
P	převodovka
PA	pastorek
RL	radiální ložisko
S	spojka

# 1 ÚVOD

Axiální hydrostatické ložisko patří mezi kluzná ložiska, jejichž zatěžující síla působí ve směru osy uložení. Hydrostaticky mazána ložiska vytvářejí souvislou vrstvu maziva mezi dvěma plochami, kde vzniká kapalně tření. Zdrojem tlaku je vysokotlaký hydrogenerátor, který rozvádí olej z nádrže do mazacích drážek, které jsou souměrně rozmístěny po obvodu ložiska. Rovnoměrné rozdělení tlaku je pomocí škrťacích ventilů umístěných v každé mazací větvi. Olej z ložiska stéká do otvorů v tělese a do sběrných nádob. Z nich je pak přečerpáván do hlavní nádrže.

Podmínkou kapalněho tření je neporušená vrstva mazacího filmu. V mazací drážce se předpokládá laminární proudění, neboť mazací film tvoří velmi úzkou vrstvu ( $0,05 \div 0,15$  mm). Kluzná vrstva musí dosahovat dostatečné tloušťky, větší než součet mikrogeometrických a makrogeometrických nerovností odchylky od ideálního geometrického tvaru a současně přenášet zátěžnou sílu z jedné plochy na druhou. Teoreticky nedochází při kapalném tření k opotřebení. Porušením mazacího filmu dochází ke smíšenému nebo suchému tření. V místě kontaktu pak dochází k opotřebení.

Projekční návrh axiálního hydrostatického ložiska je určen pro obráběcí stroj DF 4600 CNC. Koncepce speciální frézky vychází z požadavků na opracování střední části zdvihu klikového hřídele (mezi listy). Jedná se o velké klikové hřídele používané u dvoutaktních spalovacích motorů na lodích. Frézka má být používána jako jednoúčelový stroj pro určitý druh prací, převážně hrubovacích (opracování frézovacím kotoučem) a hladících operací. Stroj musí být funkčně maximálně variabilní s možností jednoduché přestavby a úpravy podle požadavků jednotlivých výrobků. [16]

Cílem diplomové práce je konstrukční návrh axiálního hydrostatického ložiska, které je součástí otočného stolu. Působí na něj maximální zátěž 30 000 kg a otáčky se mění od  $0 \text{ min}^{-1}$  až do  $40 \text{ min}^{-1}$ .

Základní tvar a rozměry ložiska budou definovány podle výkresové dokumentace firmy Interfluid spol. s r.o. Jednotlivé konstrukční varianty řešení se budou lišit tvarem mazací a vyvíjecí drážky. Pomocí programu Autodesk Inventor vytvořím prostorový (3D) model axiálního kluzného ložiska. Výsledný model vyexportuji do programu Gambit, který využiji k úpravě geometrie, vytvoření výpočetní sítě a definování okrajových podmínek. Následně definuji odpovídající matematický model proudění v úzké mezeře. Pro numerickou simulaci proudění metodou konečných objemů použiji výkonný CFD program

Fluent. Vyhodnotím základní proudové veličiny (tlakové a rychlostní pole) a únosnost ložiska ve fluidní vrstvě jednotlivých variant řešení axiálního hydrostatického ložiska. Posouzení různých konstrukčních úprav ložiska by mělo ukázat, která varianta řešení má nejlepší vlastnosti pro správnou funkci a chod stroje. Případně, kterým směrem by se konstrukční návrh axiálního hydrostatického ložiska měl ubírat.

## 2 CHARAKTERISTIKA KLUZNÝCH LOŽISEK A JEJICH ROZDĚLENÍ

Ložisko je spojení součástí, které umožňuje vzájemný pohyb posuvný nebo rotační a přenáší zatížení. Podle směru zatěžující síly rozdělujeme ložiska na radiální (zatížení působí kolmo na osu uložení) a axiální (zatížení působí ve směru osy uložení). Podle druhu tření rozdělujeme ložiska na kluzná a valivá.

### Základní rozdělení ložisek

- ❖ Valivá ložiska
- ❖ Kluzná ložiska
  - Podle druhu zatížení
    - Radiální
    - Axiální
  - Podle funkčního hlediska
    - Samomazná s tuhými mazivy
    - Samomazná pórovitá (sycené mazivy)
    - S omezeným mazáním (pracují s malým množstvím maziva)
    - Hydrodynamická (hydrodynamicky mazána ložiska)
    - Hydrostatická (hydrostaticky mazána ložiska)

Mazací kapalina se může mezi kluzné plochy dodávat pod určitým tlakem, pak se jedná o hydrostatická ložiska (resp. aerostatická ložiska), hydrodynamická ložiska (resp. aerodynamická ložiska), nebo je již v ložisku určitá mazací vrstva (samomazná ložiska).

### Samomazná ložiska s tuhými mazivy

Jsou určena pro práci bez mazání olejem nebo plastickým mazivem. Obvykle obsahují mazací látku ve své struktuře, která za chodu ložiska vystupuje na povrch. Používají se

v uloženích, kde pro nízké či velmi vysoké teploty okolí není možné použít olej nebo tuk.[5]

### Samomazná pórovitá ložiska

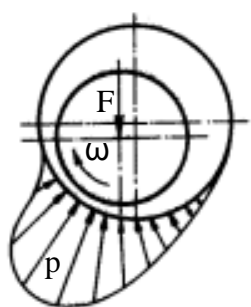
V pórovité kostře mají olej, který se při pohybu uvolňuje na povrch a maže tak kluzné plochy ložiska. Vyrábí se práškovou metalurgií. Požívají se v menších strojích a zařízeních. Jejich výhodou je dlouhý provoz bez obsluhy a nízká cena.

### Ložiska s omezeným mazáním

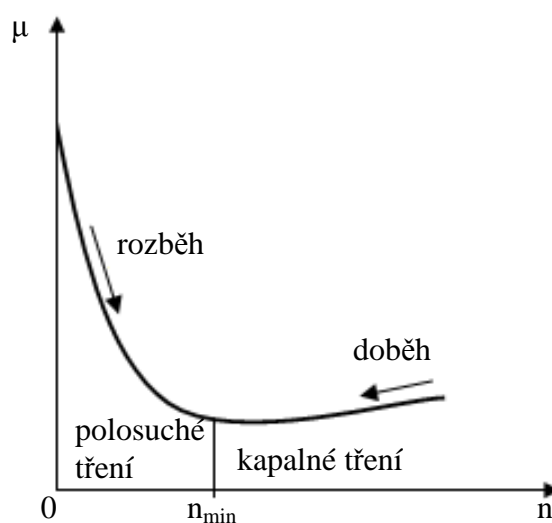
Využívají dobrých kluzných vlastností materiálu s minimálním přidáním oleje nebo plastického maziva. Používají se pro oblasti smíšeného tření, jsou odolné proti zadírání a opotřebení.

### Hydrodynamicky mazána ložiska

Jedna ze stěn ložiska vtahuje do klínové mezery olej a tím vytváří tlakové pole, které odděluje kluzné plochy (obr. 2.1). Na únosnost ložiska má podstatný vliv geometrický tvar klínovité vůle. Při nízkých rychlostech klesá tloušťka nosného klínu a dochází ke změně kapalného tření na tření smíšené (obr. 2.2). Zvýšení součinitele tření  $\mu$  v oblasti  $0 - n_{\min}$  přispívá k porušení celistvosti kapalně vrstvy, klesá životnost ložiska, dochází k trhavému pohybu (stick-slip). Výhodou hydrodynamických ložisek je, že vytvářejí potřebný tlak v nosné vrstvě kapaliny bez cizího zdroje. [2]



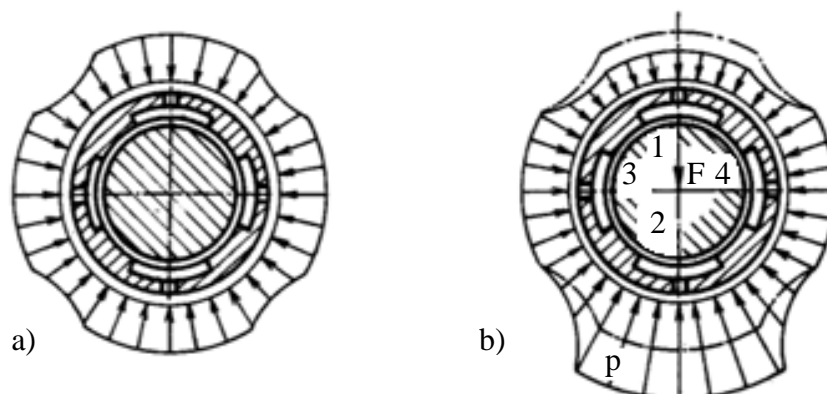
Obr. 2.1 Schéma rozložení tlaku oleje v radiálním hydrodynamickém ložisku [2]



Obr. 2.2 Průběh součinitele tření v hydrodynamickém ložisku v závislosti na otáčkách rotoru hydraulických strojů [2]

## Hydrostaticky mazána ložiska

Mohou být axiální nebo radiální. Nosné plochy ložisek bývají rovinné, válcové, kulové a kuželové. Vrstvu maziva zajišťuje výkonný hydrogenerátor, tak aby byly kluzné plochy po celý čas dokonale oddělené. Na obr. 2.3 jsou zobrazeny tlakové poměry nezatíženého a zatíženého ložiska radiální silou  $F$ . Kapalina je přiváděna nosnými komorami 1 až 4 z tlakového zdroje. Změnou zatížení se mění rozložení tlaku v kapalině nezávisle na otáčkách rotoru. To napomáhá k stabilizačnímu středění rotoru. [2]



Obr. 2.3 Tlakové poměry v radiálním hydrostatickém ložisku, a) nezatížené, b) zatížené silou [2]

## 2.1 Parametry pro volbu kluzného ložiska

Projekčnímu návrhu ložiska musí předcházet pečlivé uvážení všech jeho požadavků. Tyto požadavky lze rozdělit do tří skupin:

- ❖ Funkční: hlavní požadavky jsou únosnost ložiska, provozní teplota, třecí ztráty, vzájemná rychlost ploch, hlučnost a trvanlivost ložiska.
- ❖ Ekonomické: cena ložiska, materiálové požadavky, jakost a množství materiálu.
- ❖ Speciální: mohou být rozličné, např. velmi nízká nebo naopak velmi vysoká teplota okolí, odolnost proti korozi, nutnost použít určité látky jako maziva (kyseliny, louhy, plyny,...). [14]

### Třecí ztráty

Kluzná ložiska v oblasti kapalného tření mají třecí ztráty stejné nebo i menší než valivá ložiska. Tato ložiska musí být však nejen správně vypočtena, konstrukčně vyřešena, pečlivě vyrobena, ale musí být též spolehlivě mazána mazivem odpovídající viskozity.

Kluzná ložiska pracující v oblasti mezního mazání mají třecí ztráty podstatně větší než ložiska valivá.

### Provozní teplota

Pokud je teplota okolí velmi nízká, jsou vhodná ložiska valivá, neboť ztuhnutí maziva není pro valivá ložiska tak nebezpečné jako pro ložiska kluzná. U kluzných ložisek, pracujících v oblasti kapalného tření, se musí mazivo v mazací soustavě předehtřívát, má-li být jejich rozběh bezpečný. U některých minerálních olejů je přípustná teplota maziv až 250 °C.

**Tab. 2.1** Vlastnosti kluzného ložiska

		Kluzná ložiska				
		s hydrodynamickým mazáním			s hydrostatickým mazáním	
		radiální	axiální		radiální	axiální
s pevnými segmenty	s naklápěcími segmenty					
Únosnost	Radiální	střední	-	-	vysoká	-
	Axiální	-	střední	vysoká	-	vysoká
Obvodová rychlost čepu	do 1 m.s <sup>-1</sup>	nevhodná	nevhodná	nevhodná	vyhovuje velmi dobře	
	do 3 m.s <sup>-1</sup>	vyhovuje velmi dobře	vyhovuje velmi dobře			
	do 15 m.s <sup>-1</sup>					
	nad 15 m.s <sup>-1</sup>					
Teplota ložiska	pod 0°C	nevhodná	nevhodná	nevhodná	vyhovuje	vyhovuje
	do 100°C	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje
	nad 200°C	závisí na mazivu	závisí na mazivu		závisí na mazivu	
Třecí odpor	statický	malý	malý	malý	velmi malý	velmi malý
	kinematický	velmi malý	velmi malý	velmi malý	velmi malý	velmi malý
Trvanlivost		velmi dlouhá	střední	velmi dlouhá	bez omezení	
Požadavek na mazání		rozhoduje viskozita a množství maziva			rozhoduje viskozita a vstupní tlak maziva	
Útlum vibrací		dobry	malý	malý	dobry	malý
Hlučnost při větším počtu otáček		bezhluchné	bezhluchné		bezhluchné	

Z Tab. 1 vyplývá, že axiální hydrostatická ložiska mají velmi vysokou únosnost a jsou vhodné pro všechny obvodové rychlosti (pod 1 m.s<sup>-1</sup>). Na rozdíl od axiálních hydrodynamických ložisek, která jsou pro nízké obvodové rychlosti nevhodné, neboť

nevytvoří dostatečný hydrodynamický tlak, který by udržel dostatečnou tloušťku vrstvy maziva. Provozní teplota ložiska může dosahovat 200°C (závisí na zvoleném typu maziva). Mají velmi malý třecí odpor a nekonečnou trvanlivost v případě kapalného tření, odvíjí se tedy od spolehlivosti externího zdroje maziva a jsou bezhlučné. Mají malou schopnost tlumit vibrace. Jsou provozně a výrobně náročnější než ložiska hydrodynamická.

Podobné vlastnosti pro kluzná ložiska s aerostatickým mazáním jsou uvedené v Tab. 2. Z ekonomického hlediska jsou levnější, neboť používají jako mazivo vzduch, ale jejich velkou nevýhodou je mnohem nižší únosnost.

Axiální valivá ložiska mají vysokou únosnost a střední trvanlivost, jsou vhodné pro všechny obvodové rychlosti a teplota ložiska nesmí přesáhnout 200°C (Tab. 2). Při větším počtu otáček mají značnou hlučnost a netlumí vibrace (v některých případech se ukládají do tlumících objímek nebo stojanu).

**Tab. 2.2** Vlastnosti ložiska

		Kluzná ložiska		Valivá ložiska
		s aerostatickým mazáním	s aerodynamickým mazáním	kuličková jednosměrná axiální
Únosnost	Radiální	malá	velmi malá	-
	Axiální	malá	velmi malá	velká
Obvodová rychlost čepu	do 1 m.s <sup>-1</sup>	vyhovuje velmi dobře	nevhodná	velmi dobře vyhovuje
	do 3 m.s <sup>-1</sup>		nevhodná	
	do 15 m.s <sup>-1</sup>		nevhodná	
	nad 15 m.s <sup>-1</sup>		vyhovuje velmi dobře	vyhovuje
Teplota ložiska	pod 0°C	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje
	do 100°C			nevhodné
	nad 200°C			
Třecí odpor	statický	velmi malý	velmi malý	velmi nízký
	kinematický	velmi malý	velmi malý	velmi nízký
Trvanlivost		bez omezení	velmi dlouhá	střední
Požadavek na mazání		rozhoduje teplota a vstupní tlak plynu	rozhoduje teplota, tlak a množství plynu	malý
Útlum vibrací		malý	malý	žádný
Hlučnost při větším počtu otáček		bezhlučné	bezhlučné	značná

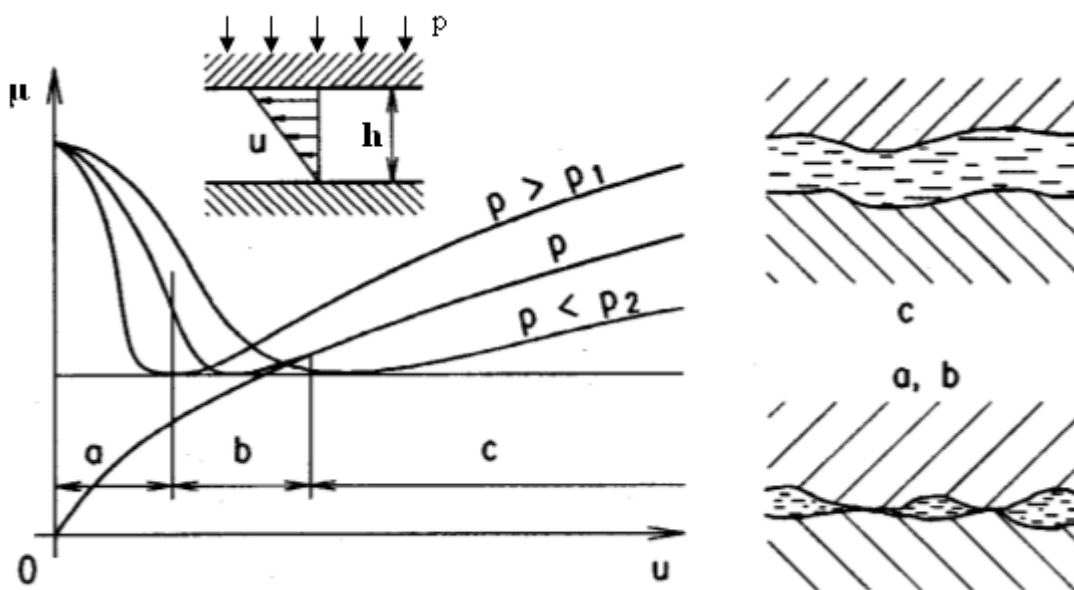
## 2.2 Tření kluzných ložisek

Tření je ztráta mechanické energie v průběhu, na začátku anebo na konci relativního pohybu navzájem se dotýkajících materiálových oblastí. [3]

Podle toho, je-li mezi stykovými plochami mazivo, či jiná látka, nebo zda jde o styk povrchů tuhých těles bez jakékoliv mezivrstvy, rozděluje se tření na:

- ❖ suché tření
- ❖ tření s tuhými mazivy
- ❖ tření s kapalným nebo plastickým mazivem
- ❖ tření s mezivrstvou plynu

Tření mezi kluznými plochami vyšetřoval experimentálně Stribeck (1902). Porovnával závislost součinitele tření na rychlosti vzájemného pohybu stykových ploch. V praxi je častým jevem, že dochází při tření za přítomnosti maziva k občasným dotykům povrchových mikronerovností stýkajících se povrchů. Jedná se o smíšené tření. [1]



Obr. 2.4 Stribeckovy křivky závislosti součinitele tření  $\mu$  na rychlosti  $u$ ,  
a) suché tření, b) smíšené tření, c) kapalné tření [1]

Při vyšších rychlostech vzájemných ploch dochází ke kapalnému tření (obr. 2.4). Oblast suchého tření přechází do smíšeného tření a při oddělení nejvyšších vrcholů kluzných ploch přechází na kapalné tření. Změnou přítláčné síly (měrný tlak  $p$ ) se mezi plochami



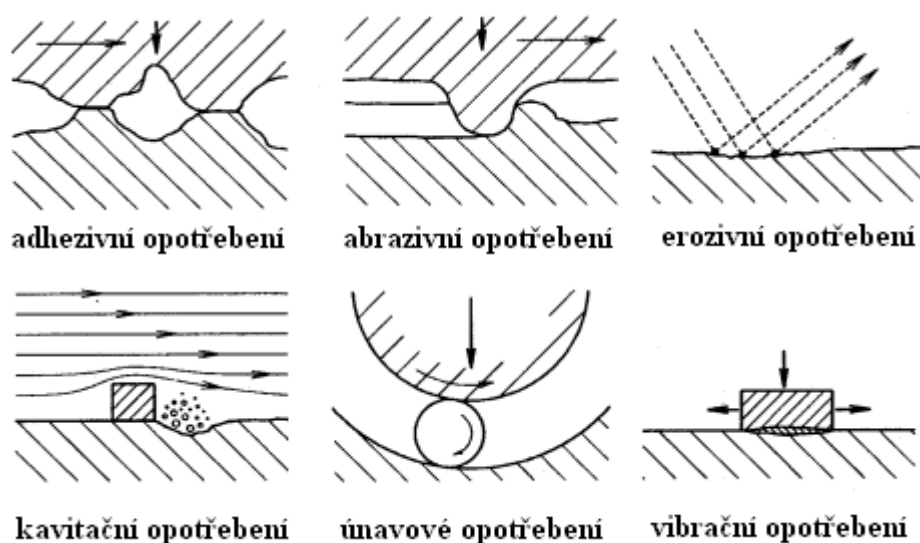
změní součinitel tření a třecí odpor. Zvětšením měrného tlaku ( $p_1 < p < p_2$ ) v oblasti kapalného tření se zmenší součinitel tření a změní se poloha minima Stribeckovy křivky.

### 2.2.1 Smíšené a suché tření

V oblasti styku kluzných ploch dochází ke kontaktu – pružné i plastické deformaci výstupků nerovností povrchů, vzniku adhezních spojů (mikrosvarů, studených spojů) a k porušení ochranné oxidické vrstvy. Dochází k opotřebování materiálu.

**Základní druhy opotřebení** (obr. 2.5):

- ❖ adhezivní
- ❖ abrazivní
- ❖ erozivní
- ❖ kavitační
- ❖ únavové
- ❖ vibrační



Obr. 2.5 Základní druhy opotřebení [1]

#### Adhezivní opotřebení

Vzniká dotykem funkčních ploch. Dochází ke vzniku mikrosvarů a následným porušením těchto mikrospojů. Tím dochází k uvolňování, vytrhávání materiálu a přenosu materiálu z jednoho povrchu na druhý.

## **Abrazivní opotřebení**

Způsobuje zarývání a řezání měkkého povrchu tělesa drsným povrchem tvrdšího tělesa.

## **Erozivní opotřebení**

Tekutinou nesené částice narážejí na povrch tělesa a tím vzniká opotřebení.

## **Kavitační opotřebení**

V místech, kde tlak klesne pod tlak nasycených par, dochází k vylučování bublinek páry, které způsobují hydrodynamické rázy a následně dochází k odtrhávání částic z povrchu.

### **2.2.2 Geometrie třecích ploch**

Výrobním postupem vzniknou na kluzném povrchu mikronerovnosti a makronerovnosti určité hodnoty (obr. 2.6). Na výrobních výkresech se předepisují maximální hodnoty drsností povrchu a odchylek tvaru od jmenovité hodnoty. Povrchové vady kluzné dvojice musí být menší než šířka mezery, aby nedocházelo ke kontaktu a aby bylo zaručeno kapalně tření. [12]



*Obr. 2.6 Základní pojmy geometrie povrchu [12]*

### **2.2.3 Kapalně tření**

Pokud oddělíme nejvyšší vrcholky nerovností mazivem, tak vznikne kapalně tření. U hydrostatických ložisek je snadou dosažení tohoto stavu, neboť v kapalně tření nevzniká opotřebení. Vnější síly vyvolávají v kapalině napěťové stavy vedoucí k trvalým posuvům, protože jim nebrání pevné skupenství. Pro kluzné plochy se určí součinitel tření  $\mu$  podle Coulombova zákona [1]:

$$\mu = \frac{F_t}{F} \quad (2.1)$$

kde  $\mu$  je součinitel tření [1]

$F_t$  – třecí síla [ N ]

$F$  – zátěžná síla [ N ]

Třecí síla je v tomto případě dána tečnými napětími v kapalině na povrchu tělesa.

$$F_t = S \cdot \tau \quad (2.2)$$

kde  $S$  je styčná plocha třecích povrchů [  $m^2$  ]

$\tau$  – tečné napětí [ Pa ]

Pak lze třecí sílu vyjádřit vztahem:

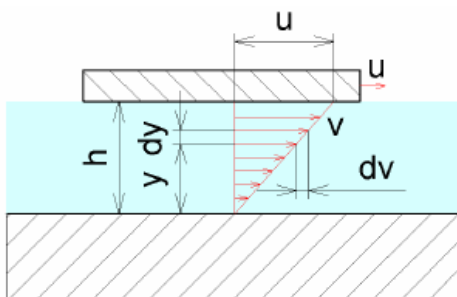
$$F_t = \eta \frac{S \cdot v}{h} \quad (2.3)$$

kde  $\eta$  je dynamická viskozita [ Pa.s ]

$v$  – lineární rychlost pohybu třecích povrchů [  $m \cdot s^{-1}$  ]

$h$  – tloušťka mazací vrstvy [ m ]

Na obr. 2.7 je zobrazeno proudění skutečné kapaliny mezi dvěma rovnoběžnými deskami, spodní je v klidu a horní se pohybuje rychlostí  $u$ . Částice lpící na povrchu desky mají jejich rychlost, z toho vyplývá, že částice lpící na horní desce se pohybují rychlostí  $u$  a částice na spodní desce mají nulovou rychlost. Ostatní částice tekutiny, které proudí v mezeře mezi deskami, mají lineárně rozložené rychlosti. Pohybující se částice strhává sousední částice do pohybu vlivem vazkého tření.



Obr. 2.7 Rozložení rychlosti při laminárním proudění mezi dvěma deskami [7]

Rychlost částice ve vzdálenosti  $y$  od stojící desky je definována:

$$v = u \frac{y}{h} \quad (2.4)$$

Tečné napětí v kapalině od vazkosti je určeno podle Newtona:

$$\tau = \eta \cdot \frac{dv}{dy} = \eta \frac{u}{h} \quad (2.5)$$

kde  $\frac{dv}{dy}$  je gradient rychlosti ve směru kolmém na osu  $y$  [ $s^{-1}$ ]

## 2.3 Axiální hydrostatická ložiska

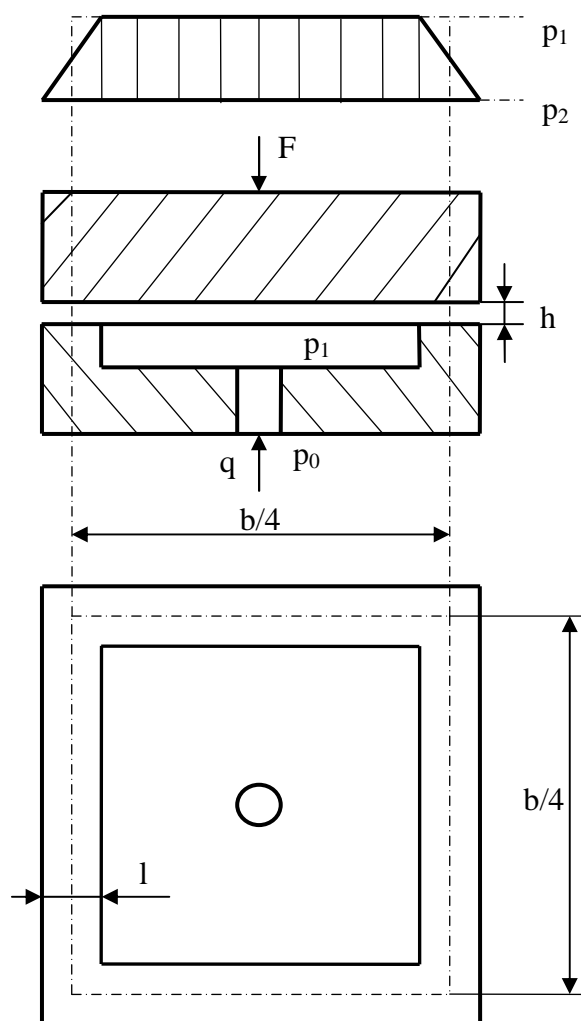
Axiální hydrostatická ložiska tvoří dvě kluzné plochy. Na spodní kluzné ploše jsou vytvořeny mazací kapsy. Mazivo protéká z kapsy mezerou a jeho tlak klesá až na barometrický tlak. Únosnost je vyvolána hydrostatickým tlakem v kapalině, kterou vytváří výkonný hydrogenerátor (nebo více hydrogenerátorů). Únosnost nezávisí na relativní kluzné rychlosti. Laminární průsak kapaliny z nosných komor vytékající úzkými škrtícími spárami o tloušťce  $h$  je dán Hagen – Poiseullovým vztahem pro rovinné hydrostatické ložisko (obr. 2.8) [2]:

$$q = \frac{p_1 - p_2}{12 \cdot \mu \cdot l} b \cdot h^3 \quad (2.6)$$

kde  $q$  je laminární průsak kapaliny [ $m^3 s^{-1}$ ]

$p_1, p_2$  – tlaky v ložisku [ $Pa$ ]

$b, l$  – rozměry ložiska [ $m$ ] (obr. 2.8)



Obr. 2.8 Schéma rovinného hydrostatického ložiska [2]

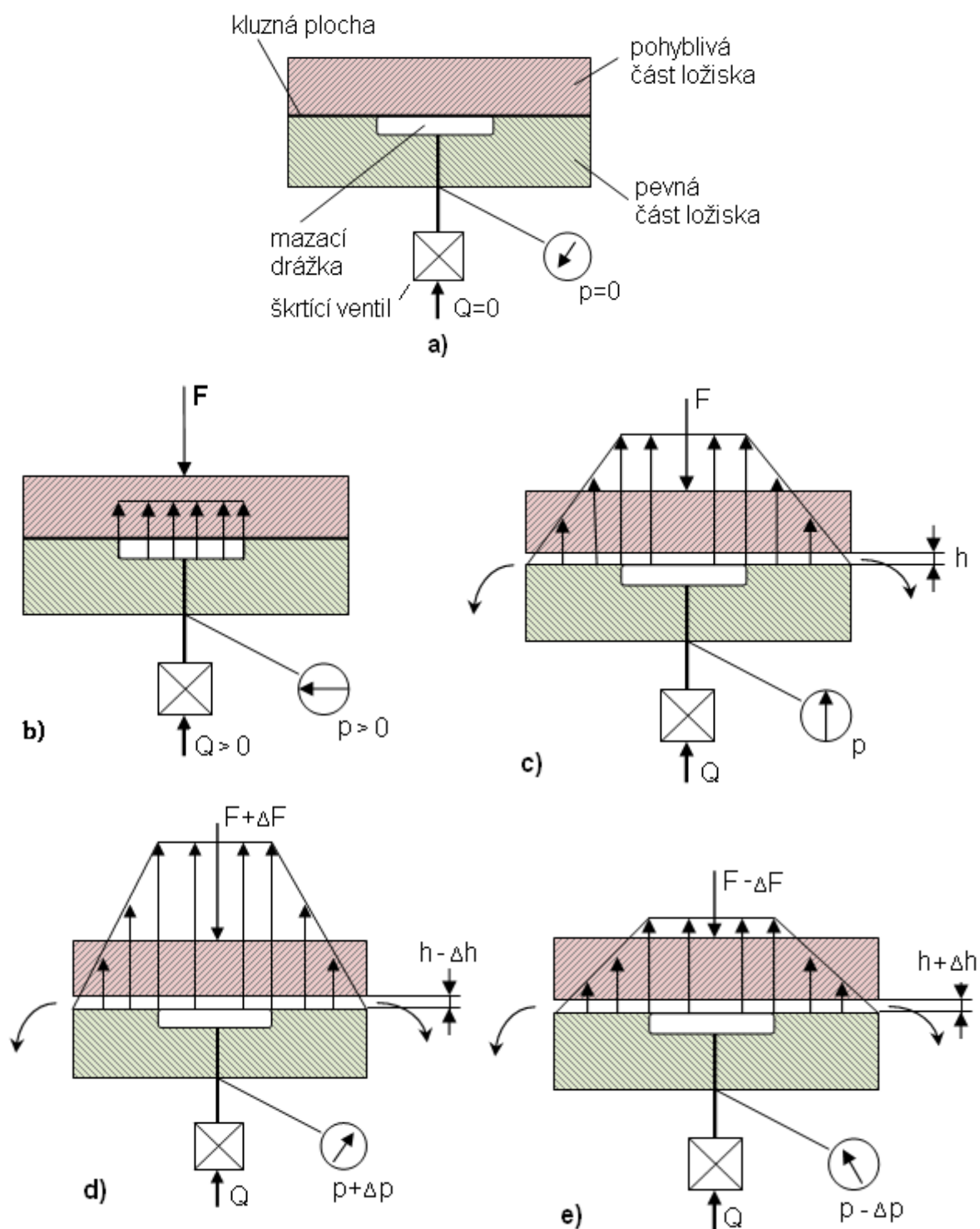
Při vypnutém přívodu tlakové kapaliny (zastaveném čerpadle) dochází ke styku kluzných ploch (obr. 2.9 a) a tím probíhá suché tření. Proto se volí vhodná kluzná dvojice, která má při daném stavu minimální opotřebení.

Při zatížení hydrostatického ložiska se zapne čerpadlo (b), tlaková kapalina se přes škrtící ventil dostane do kapsy, kde se rovnoměrně rozlije a začne působit na pohyblivou část ložiska.

Hydrostatický tlak v kapse nadzvedne horní kluznou plochu (c) do výšky  $h$ . Nyní mezi kluznými plochami nastalo kapalné tření a horní deska se může začít pohybovat.

Kolísáním zátěžné síly  $F$  se mění velikost spáry  $h$  i rozložením tlaku v ložisku. Pokud se zatížení zvýší (d), tloušťka mazacího filmu se zmenší, dokud se nezvýší hydrostatický tlak, který je regulován škrtícím ventilem.

Pokud se zátěž sníží (e), tloušťka mazacího filmu se zvětší, dokud se nesníží hydrostatický tlak.



Obr. 2.9 Schéma axiálního hydrostatického ložiska

Autoregulační závislost na zatížení ložiska reagujících veličin  $F = f(p_0, h)$  se nazývá stabilizační schopnost hydrostatických ložisek. Mírou stability je stupeň zatížení ložiska

$$\lambda = \frac{p_1}{p_0} \quad (2.7)$$

kde  $\lambda$  je stupeň zatížení [1]

$p_0$  – konstantní tlak čerpadla [Pa]

$p_1$  – tlak v ložisku [Pa]

U hydrostatických ložisek je stabilizační schopnost omezována jednak odtrhováním nosných ploch, kdy se  $p_1 \rightarrow p_2$  a stupněm zatížení  $\lambda = 0$ , nebo stavem  $p_1 \rightarrow p_0$  a stupněm zatížení  $\lambda = 1$ . Pokud je stupeň zatížení  $\lambda > 1$ , kluzná vrstva nestačí unášet zatížení a dochází ke styku kluzných ploch, ložisku se pak říká „hydrostaticky odlehčené ložisko“. Hydrostaticky vyvážená ložiska mají stupeň zatížení  $\lambda \approx 0,5$ , aby stabilizační schopnost dostatečně obsáhla kolísání zátěžné síly.

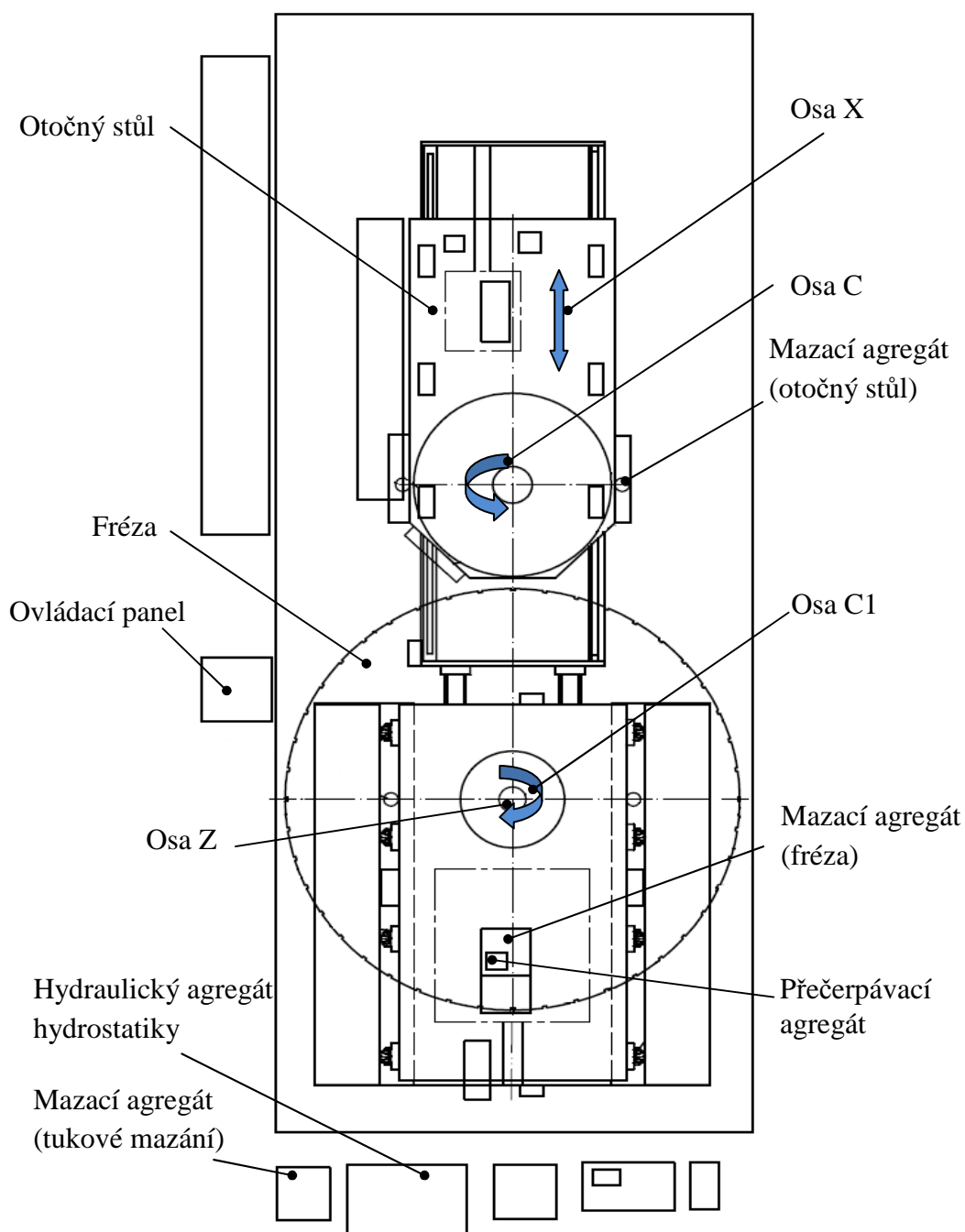
Hydrostaticky vyvážená ložiska mají vysokou životnost a jsou prakticky nezávislá na rychlostech kluzných ploch. [2]

### 3 TECHNICKÝ POPIS PRACOVNÍHO STROJE DF 4600 CNC

Obráběcí stroj DF 4600 CNC je speciální frézka sloužící k opracování střední části zdvihu klikové hřídele (mezi listy). Jedná se o velké klikové hřídele používané u dvoutaktních spalovacích motorů na lodích. Frézka má být používána jako jednoúčelový stroj pro určitý druh operací, převážně hrubovacích (opracování frézovacím kotoučem) a hladících operací. Stroj je funkčně maximálně variabilní a přizpůsobivý s možností jednoduché přestavby a úprav dle požadavků jednotlivých výrobků. [16]

Fréza (obr. 3.1) se skládá z vřeteníku, který nese frézovací kotouč o průměru 4600 mm a pohyblivého vřeteníku, který je osazen otočným stolem. Na otočném stole je upevněn klikový hřídel. Frézovací kotouč může vykonávat dva pohyby. Otáčet se kolem své osy (osa C1) a vykonávat pohyb nahoru a dolů. Pohyb osy se označuje jako osa Z. To se používá při hrubování. Obrobek v té době stojí, nebo se pomalu otáčí. Při jemném

opracování frézovací kotouč stojí a obrobek se otáčí a posouvá do řezu v ose X. Otočný stůl může vykonávat rotační pohyb (osa C) a celý vřeteník se pohybuje směrem k frézovacímu kotouči a od něj (osa X).

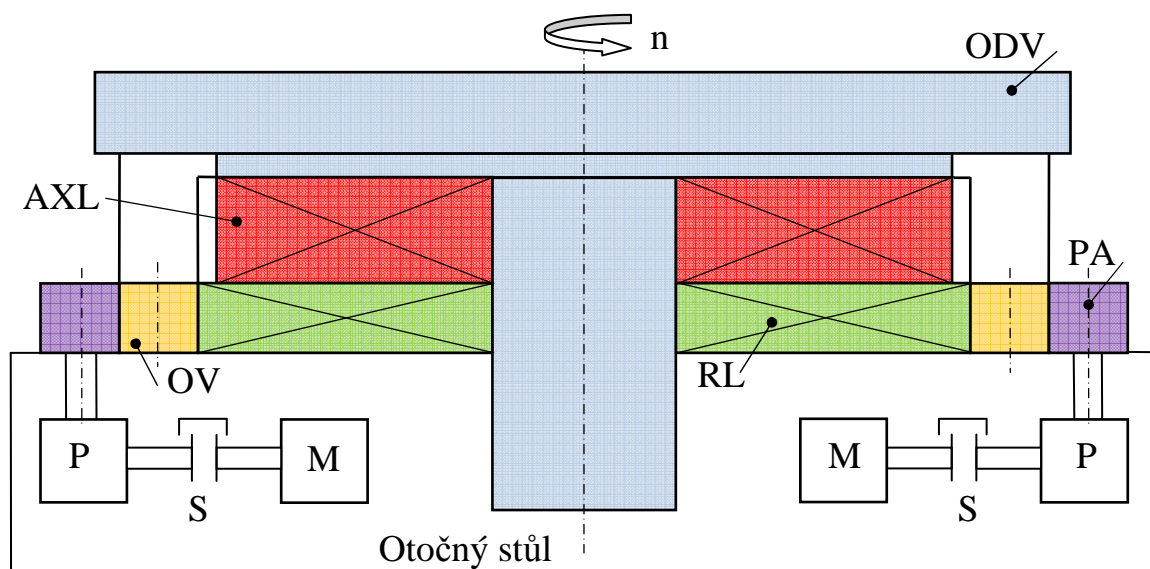


Obr. 3.1 Schéma stroje DF 4600 CNC [16]

Axiální hydrostatické ložisko se nachází mezi otočnou deskou vřeteníku (obr. 3.2) a saněmi stroje (otočný stůl). Umožňuje plynulé řízení stroje i při pomalém posuvu. Působí na něj maximální zatížení 30 000 kg a otáčky se mění od 0 min<sup>-1</sup> až do 40 min<sup>-1</sup>. Axiální pohyb ložiska je omezen na hodnotu 0,15 mm, kvůli přesnosti výroby.



Zatížení otočné desky vřeteníku je přenášeno na axiální hydrostatické ložisko. Otáčení desky se provádí pomocí dvou motorů (výkon motoru 2 x 39 kW). Motor je přes spojku propojen s převodovkou, která je napojena na pastorek. Ozubený věnec je na pevno propojen s otočnou deskou a otáčí se pomocí dvou pastorků. Celý otočný stůl se nachází na saních, které umožňují lineární pohyb.



Obr. 3.2 Schéma umístění axiálního hydrostatického ložiska: ODV – otočná deska vřeteníku, AXL – axiální hydrostatické ložisko, PA – pastorek, OV – ozubený věnec, RL – radiální ložisko, P – převodovka, S – spojka, M – motor

### 3.1 Hydraulický agregát axiálního hydrostatického ložiska

Zdrojem tlakové kapaliny v axiálním hydrostatickém ložisku je hydraulický agregát. Firma Interfluid spol. s r.o. navrhla geometrii axiálního hydrostatického ložiska a pro ni příslušný hydraulický agregát (obr. 3.3). Při zkušebním provozu se objevily problémy v chodu, ložisko mělo nerovnoměrný chod, zadržávalo se. Čerpadlo nedokázalo vytvořit dostatečnou vůli v ložisku, a proto byl navržen výkonnější hydraulický agregát.

Nosným prvkem hydraulického agregátu je ocelová nádrž o objemu 400 L. Na ní je umístěn elektromotor (5,5 kW) propojený se zubovým hydrogenerátorem ( $50 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ ), který je zdrojem tlakové energie v obvodu. Kapalina do obvodu prochází dvojitým tlakovým filtrem. Obvod je chráněn pojistným ventilem. Dále se v hydraulickém agregátu nachází samostatná filtrační, ohřívací a chladicí jednotka. Filtrace kapaliny probíhá trvale. Pokud pracovní teplota klesne pod  $5^\circ\text{C}$ , termostat zapne ohřívač. Překročí-li pracovní

teplota 20°C, ohřívač se vypne. Chladicí jednotka udržuje teplotu pracovní kapaliny na konstantní hodnotě 26°C ± 2°C. [16]



*Obr. 3.3 Hydraulický agregát [16]*

**Technické parametry původního hydraulického agregátu [16]**

Objem nádrže	400 L
Průtok	35,2 L.min <sup>-1</sup>
Pracovní tlak	3 MPa
Hydraulická kapalina	minerální olej VG 46
Výkon elektromotoru	3 kW
Výkon elektromotoru filtrace	1,5 kW
Silové napájení	400 V/50 Hz
Ovládací napájení	24 V DC

**Technické parametry nového hydraulického agregátu [16]**

Objem nádrže	400 L
Průtok	50 L.min <sup>-1</sup>
Pracovní tlak	4,5 MPa
Hydraulická kapalina	minerální olej VG 46
Výkon elektromotoru	5,5 kW / 1450 min <sup>-1</sup>
Výkon elektromotoru filtrace	1,5 kW
Silové napájení	400 V/50 Hz
Ovládací napájení	24 V DC

Z hydraulického agregátu je olej přiveden do rozvodného bloku (obr. 3.4), kde je kapalina pomocí škrtkících ventilů se stabilizací tlakového spádu rovnoměrně rozdělena do jednotlivých mazacích drážek. Na axiálním hydrostatickém ložisku se nachází celkem 6 kapes. V každé kapse je pomocí tlakového spínače snímán tlak.



Obr. 3.4 Rozvodný blok [16]

### 3.2 Vlastnosti pracovní kapaliny

Pro pracovní teplotu 24°C – 28°C v obvodu jsem zvolil olej MOGUL HV 46 (Tab. 3.1). Je to hluboce rafinovaný ropný olej s přísadami proti oxidaci, opotřebení a pění. Doporučuje se pro vysoce namáhané hydrostatické mechanismy. Obsahuje přísady pro zvýšení viskózního indexu. Má vysoký viskózní index (170), a proto má nízkou závislost viskozity na teplotě. Patří do IV. třídy hořlavosti s bodem vzplanutí 220°C. [11] [17]

Tab. 3.1 Vlastnosti oleje

Klasifikace ISO 6743	Viskozita při 40°C [mm <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]	Viskózní index	Bod vzplanutí [°C]	Bod tuhnutí [°C]	Hustota [kg.m <sup>-3</sup> ]	Klasifikace DIN 51 502
MOGUL HV 46	46	170	220	-36	874	HVLP 46

V zásadě větší viskozita zlepšuje mazací schopnost a těsnicí vlastnosti kapaliny, ale na druhé straně zpomaluje rychlost reakce soustavy, zvětšuje vnitřní tření a tlakový spád v soustavě. [13]

## 4 TEORIE PROUDĚNÍ V ÚZKÉ MEZEŘE

Při řešení proudění budu vycházet z předpokladu spojitého, izotropního prostředí (kapalina má ve všech částech kapaliny stejné vlastnosti, nezávisle na jejich poloze a směru působení sil). To umožňuje řešit proudění na elementárním objemu a odvozené zákonitosti následně odvodit pro celý objem.

V axiálním hydrostatickém ložisku budu uvažovat prostorové (3D) proudění, skutečné (vazké) kapaliny. Kapalina se pohybuje v tenkých vrstvách, a proto předpokládám laminární proudění.

Síly, které mohou působit na elementární objem lze obecně rozdělit na síly hmotnostní (objemové) a síly plošné. Hmotnostní síly jsou síly od pohybu kapaliny a vnější hmotnostní síly, např. tíhová síla, odstředivá síla, setrvačná síla a hybnostní síla. Mezi plošné síly patří např. třecí síla, tlaková síla a povrchové napětí. [7][8][9][10]

### Stanovení Reynoldsova čísla v axiálním hydrostatickém ložisku

Kinematická viskozita oleje:

$$\nu = 46 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1} = 0,000046 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Objemový průtok na jednu mazací kapsu:

$$Q_v = 0,00013889 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Plocha mazací kapsy (pro šířku kapsy 40 mm):

$$S = 0,01626 \text{ m}^2$$

Charakteristický rozměr:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} \tag{4.1}$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,01626}{\pi}} = 0,144 \text{ m}$$

Střední rychlost:

$$u_s = \frac{Q_v}{S} \tag{4.2}$$

$$u_s = \frac{0,00013889}{0,01626} = 0,00854 \text{ m.s}^{-1}$$

Reynoldsovo číslo:

$$\text{Re} = \frac{u_s \cdot d}{\nu} \quad (4.3)$$

$$\text{Re} = \frac{0,00854 \cdot 0,144}{0,000046} = 26,7$$

V úzké mezeře axiálního hydrostatického ložiska můžeme předpokládat podle podobnostního bezrozměrného Reynoldsova čísla laminární proudění ( $\text{Re} \leq \text{Re}_K = 2320$ , pro kruhové potrubí) pro všechny varianty řešení.

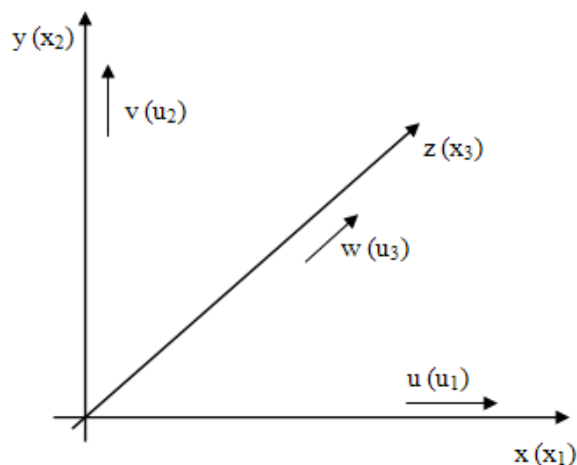
#### 4.1 Základní rovnice proudění skutečné kapaliny

Základní fyzikální zákony popisující proudění skutečných kapalin jsou zákony zachování hmotnosti, hybnosti a energie. Jsou vyjádřeny rovnicí kontinuity a Navierovými – Stokesovými rovnicemi. V případě nestacionárního, nestlačitelného, neizotermního proudění mají tvar:

**Rovnice kontinuity** v diferenciálním tvaru:

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (4.4)$$

kde vektor rychlosti je definován  $\vec{u} = (u, v, w)$ ,  $\rho$  je hustota.



Obr. 4.1 Souřadný systém

## Navier – Stokesova rovnice

Stanoví-li se rovnováha všech sil, které působí na elementární objem, dostaneme Navier – Stokesovu rovnici pro nestlačitelnou tekutinu

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \cdot \text{grad} \bar{u} = \bar{a}_0 - \frac{1}{\rho} \text{grad} p + \nu \Delta \bar{u} \quad (4.5)$$

kde  $a_0 = \text{grad} U$  je vnější zrychlení, neboli složka vnější objemové síly

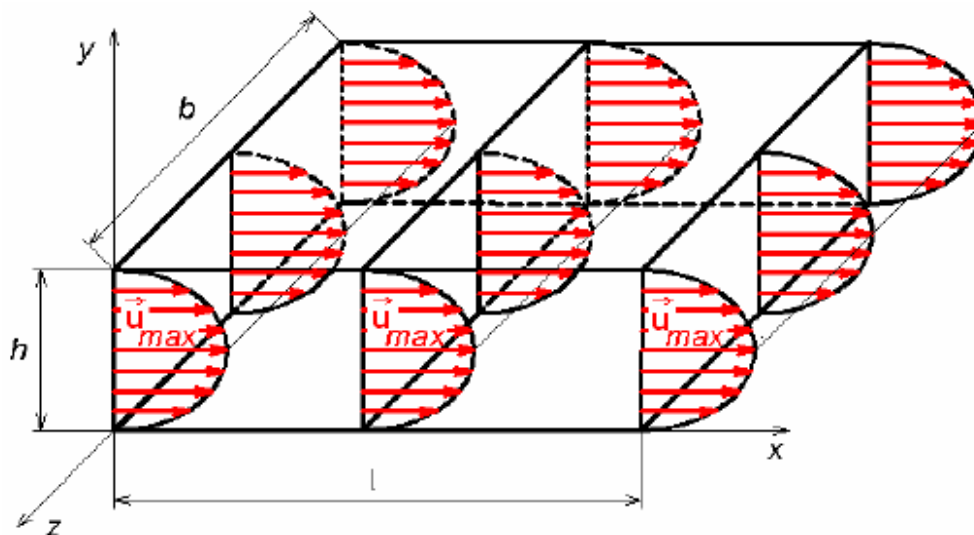
$\Delta$  – Laplaceův operátor aplikovaný na tři souřadnice rychlosti

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (4.6)$$

$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t}$  – tzv. lokální (místní) derivace, která není závislá na přemísťování tekutiny

## 4.2 Laminární proudění v úzké mezeře

Proudění lze popsat pomocí rovnice kontinuity a Navier – Stokesovy rovnice, která vyjadřuje rovnováhu sil tlakových, hmotnostních, třecích a setrvačných.



Obr. 4.2 Proudění mezi rovnoběžnými stěnami [7]

Pokud uvažujeme vodorovnou mezeru (obr. 4.2), jsou hmotnostní (tíhové) síly rovny nule  $\bar{a} = 0$ . Předpokládáme ustálené proudění, rychlost se v čase nemění  $\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = 0$ .

Rychlostní profil je dán pouze změnou rychlosti  $u$  po výšce štěrby  $y$ . Rychlosti

v dalších dvou osách neuvažujeme (a též derivace rychlostí jsou nulové). Pak má Navier – Stokesova rovnice tvar:

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial x} + \eta \left( \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (4.7)$$

Rovnice vyjadřuje rovnováhu tlakových a třecích sil. Předpokládáme-li, že na délce  $l$  dojde k tlakové ztrátě  $\Delta p$ , můžeme na základě tlakového spádu  $\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\Delta p}{l}$  a okrajových podmínek na stěnách odvodit rychlostní profil v úzké mezeře.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{1}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (4.8)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = -\frac{1}{\eta} \frac{\Delta p}{l} \quad (4.9)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\eta} \frac{\Delta p}{l} y + C_1 \quad (4.10)$$

$$u = -\frac{1}{\eta} \frac{\Delta p}{l} \frac{y^2}{2} + C_1 y + C_2 \quad (4.11)$$

K určení integračních konstant  $C_1$  a  $C_2$  využijeme okrajových podmínek na stěnách, kde je nulová rychlost (na ose  $y = 0$  je rychlost  $u(0) = 0$ ). Poté je po dosazení konstanta  $C_2 = 0$  a pro  $y = h$  je  $u(h) = 0$  a  $C_1 = \frac{1}{2\eta} \frac{\Delta p}{l} h$ . Výsledkem je parabolická závislost rychlosti  $u$  na  $y$ .

$$u = \frac{1}{2\eta} \frac{\Delta p}{l} (h - y)y \quad (4.12)$$

Maximální rychlost  $u_{MAX}$  je uprostřed vzdálenosti desek  $y = \frac{h}{2}$  a určí se z podmínky pro maximum, tj.  $\frac{du}{dy} = 0$ .

$$u_{MAX} = \frac{h^2}{8\eta} \frac{\Delta p}{l} \quad (4.13)$$

Střední rychlost se určí pomocí objemového průtoku

$$u_s = \frac{Q_v}{S} = \frac{Q_v}{b \cdot h} = \frac{h^2}{12\eta} \frac{\Delta p}{l} \quad (4.14)$$

Průtok se určí integrací elementárního průtoku, který protéká elementární ploškou  $b \cdot dy$ .

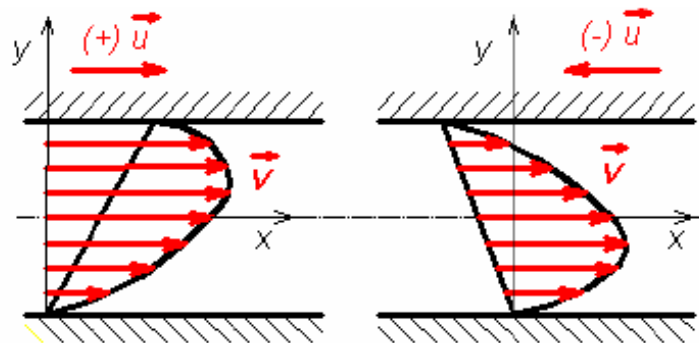
$$Q_v = b \int_0^h u \cdot dy = \frac{b}{2\eta} \frac{\Delta p}{l} \int_0^h (h \cdot y - y^2) dy = \frac{b}{12\eta} \frac{\Delta p}{l} h^3 \quad (4.15)$$

Poměr střední a maximální rychlosti je:

$$\frac{u_s}{u_{MAX}} = \frac{2}{3} \quad (4.16)$$

Proudění v úzké mezeře může také ovlivnit změna směru pohybu horní desky rychlostí  $\pm u$  (obr. 4.3). Pro tento případ se volí okrajové podmínky  $u(0) = 0$  a  $u(h) = \pm u_x$ . Tím se změní integrační konstanty a po dosazení do rovnice (4.11) je určen rychlostní profil vztahem:

$$u = \frac{\Delta p}{2\eta l} h^2 \left[ \frac{1}{4} - \left( \frac{y}{h} \right)^2 \right] \pm u_x \left( \frac{y}{h} + \frac{1}{2} \right) \quad (4.17)$$



Obr. 4.3 Rychlostní profily složeného proudění [7]

## 5 TVORBA GEOMETRIE A VÝPOČTOVÉ SÍŤ

Síť představuje systém rozdělení výpočtové oblasti na dílčí na sebe navazující 2D buňky ve dvojdimenzionálním prostoru nebo 3D buňky ve třidimenzionálním prostoru. Výpočtová oblast pokrytá sítí je základem matematického modelování. Samotný



matematický model (systém matematických vztahů) je pouze „pasivním“ nástrojem, který nabývá smyslu až ve chvíli, kdy je aplikován na konkrétní problém (výpočtovou oblast pokrytou sítí). [10]

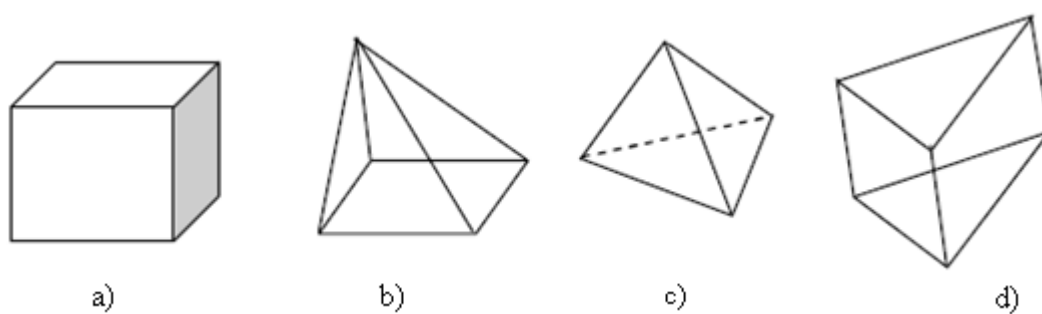
## 5.1 Charakteristika programového systému Gambit

Program Gambit umožňuje vytváření a úpravu výpočtové oblasti, kterou pokryjeme příslušnou sítí. Dále systém Gambit využívá možností načtení dat z CAD programů (IDEAS, CATIA, INVERTOR,...), definování vlastností stěn v souvislosti s okrajovými podmínkami, definování vnitřních oblastí pro případné vícefázové proudění, nebo pro stěny s přestupem tepla, atd..

Numerická metoda konečných objemů je založena na vytvoření systému nepřekrývajících se elementů, konečných objemů. Můžeme vytvořit:

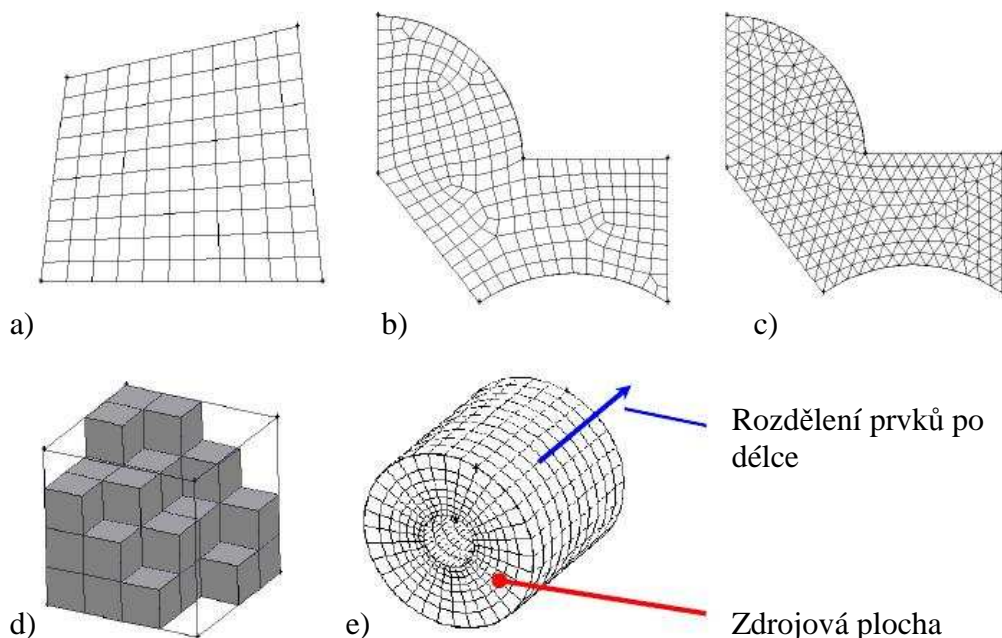
- a) strukturovanou síť
- b) nestrukturovanou síť

Strukturovaná síť je tvořena v dvourozměrné oblasti z obdélníků a křivočarých čtyřúhelníků a ve trojrozměrné oblasti z kvádrů a obecných šestistěnů. Zásadním pravidlem je, že hranice prvků musí sousedit s jedinou hranicí sousedního elementu, nelze tedy libovolně zhušťovat síť. Výsledná výpočtová oblast je buď kvádr, nebo obdélník. Nestrukturovaná síť je tvořena ve trojrozměrné oblasti z kvádrů, čtyřstěnů, prizmatických a pyramidových prvků (obr. 5.1).



*Obr. 5.1 Tvar konečného objemu: a) kvádr, b) pyramidový prvek, c) čtyřstěn, d) prizmatický prvek [10]*

Výše jmenované prvky se mohou kombinovat, a tím se získá optimální síť. Software Gambit nabízí několik schémat tvorby povrchové a objemové sítě. Např. schéma Map a Pave pro povrchové sítě a schéma Cooper pro objemové sítě (obr. 5.2). K použití schématu Cooper je nutné vytvořit povrchovou zdrojovou síť a stanovit počet nebo velikost prvků po délce.



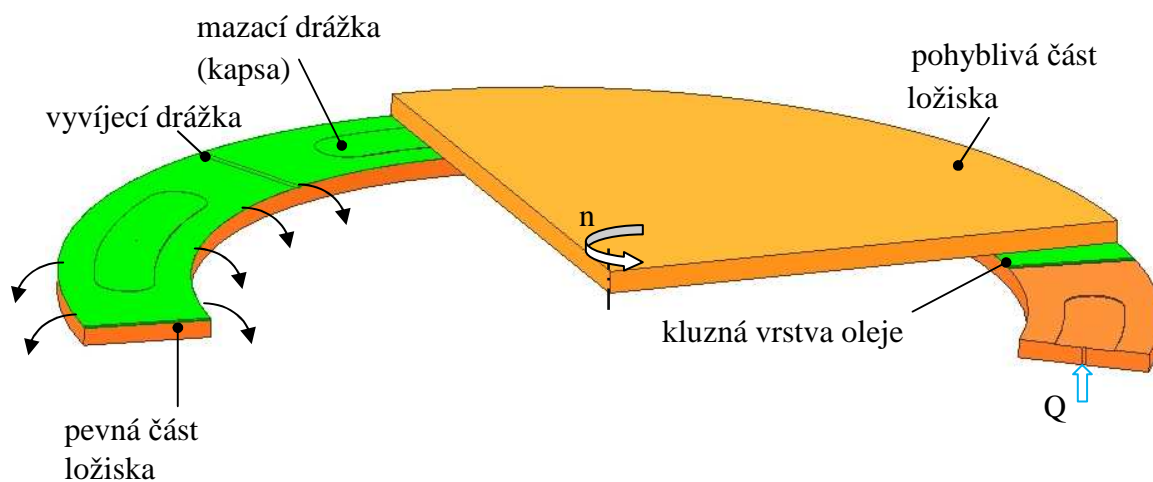
Obr. 5.2 Typy sítí: a) čtyřúhelníková strukturovaná síť, schéma Map, b) čtyřúhelníková nestrukturovaná síť, schéma Pave, c) trojúhelníková síť, schéma Pave, d) schéma Map k tvorbě objemové sítě, e) schéma Cooper k tvorbě objemové sítě [6]

Program Gambit lze použít k definování vlastností stěn v souvislosti s okrajovými podmínkami. Lze definovat 2 typy okrajových podmínek:

- ❖ okrajové podmínky na hranici (Boundary Types)
- ❖ podmínky pro oblasti kontinuity (Continuum Types), specifikace oblasti proudění (Fluid), nebo pevné látky (Solid). [4][6][10][15]

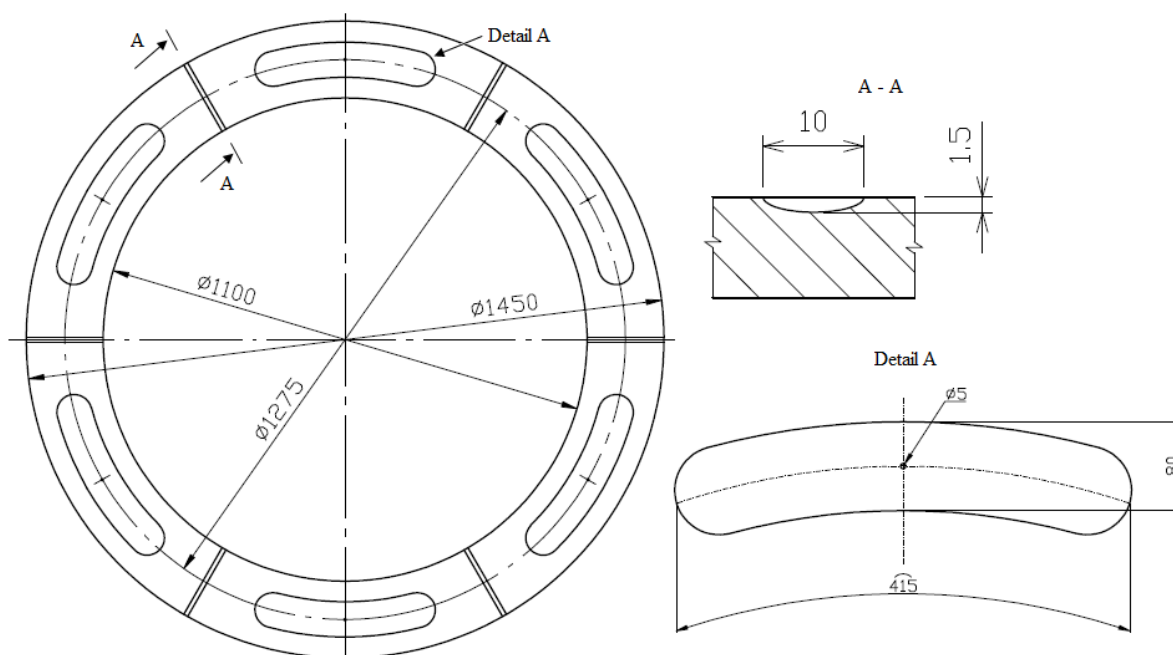
## 5.2 Výpočetní síť 3D modelu axiálního hydrostatického ložiska

Prostorový model axiálního hydrostatického ložiska byl vytvořen v grafickém systému Autodesk Inventor. Model se musel exportovat do formátu STEP, který je kompatibilní s programem Gambit, a dokáže načíst potřebná data o geometrii modelu. Po úpravě geometrie modelu, vytvoření výpočetní sítě a definování okrajových podmínek je soubor exportován do formátu MESH, který je kompatibilní s programem Fluent.



Obr. 5.3 Řez 3D modelem axiálního hydrostatického ložiska

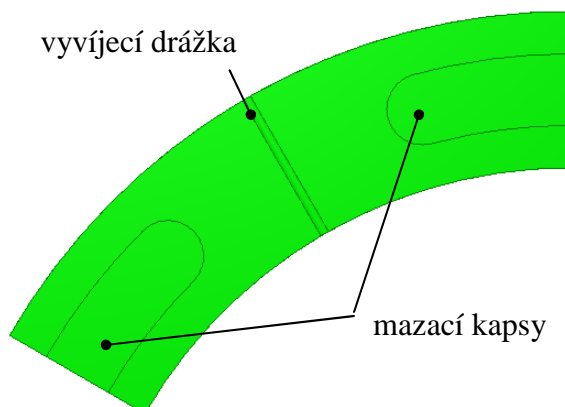
Pomocí booleovských operací se provede separace fluidní kluzné vrstvy (obr. 5.3). Pohyblivá část ložiska se otáčí otáčkami  $n = (0 - 40) \text{ min}^{-1}$ . V pevné části ložiska je vstupní otvor o průměru 5 mm. Vstupním otvorem je přiváděn olej, který se rozlije do mazací drážky (kapsy). Vyvíjecí drážka odděluje mazací kapsy, aby se navzájem neovlivňovaly svým působením.



Obr. 5.4 Geometrie axiálního hydrostatického ložiska

Základní tvar a rozměry výpočetní oblasti byly vytvořeny podle výkresové dokumentace firmy Interfluid spol. s r.o. (obr. 5.4). Maximální průměr ložiska je  $\phi 1450$  mm a minimální  $\phi 1100$  mm. Ložisko má 6 mazacích kapes (tvar a rozměr viz obr. 5.4, detail A), které jsou oddělené vyvíjecími drážkami (tvar a rozměry viz obr. 5.4, řez A-A). Geometrie je

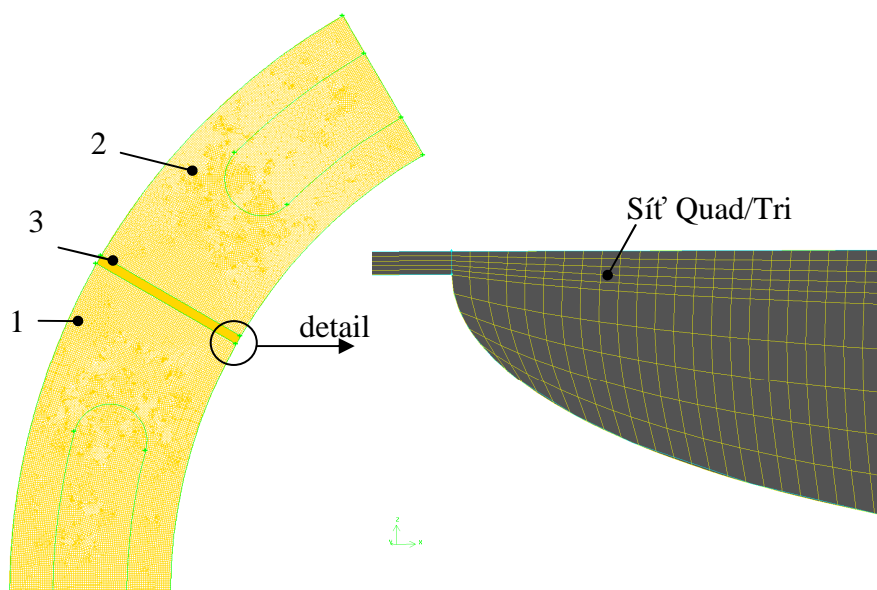
periodická, můžeme tedy vytvořit zjednodušený objem ( $\frac{1}{6}$  objemu). Provedu vyčištění geometrie (zaoblení hran nebudu uvažovat), tak že výsledný model je znázorněn na obr. 5.5.



*Obr. 5.5 Vytvořený zjednodušený model*

### 5.2.1 Vytvoření sítě axiálního hydrostatického ložiska

Vytvořený zjednodušený model ložiska byl rozdělen na 3 části (obr. 5.6). V částech 1,2 byla použita plošná nestruturovaná čtyřúhelníková síť a v části 3 byla zvolena pro čelní plochu síť Quad/Tri (čtyřúhelník/trojúhelník). Pro objemy byla použita nestruturovaná síť Hex/Wedge (šestistěnná/pyramidová síť), schéma Cooper. [15]



*Obr 5.6 Vytvořená síť s detailem vyvíjecí drážky*

## 6 MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ V ÚZKÉ MEZEŘE AXIÁLNÍHO HYDROSTATICKÉHO LOŽISKA

### 6.1 Charakteristika programového systému Fluent

Numerické modelování mnoha fyzikálních jevů je úzce spojeno s modelováním určité formy pohybu matematickými prostředky. Pohyb tekutin je spojen s řešením nejrůznějších problémů, daných fyzikálním modelem:

- ❖ laminární a turbulentní proudění v jednoduchých i složitých geometriích
- ❖ stlačitelné a nestlačitelné proudění
- ❖ přenos tepla, přirozená a smíšená konvekce, radiace
- ❖ přenos chemické příměsi včetně chemických reakcí
- ❖ vícefázové proudění, proudění s volnou hladinou, proudění s pevnými částicemi, bublinami, resp. kapkami
- ❖ hoření a chemické reakce
- ❖ proudění porézním prostředím, atd.

Matematický model spočívá v definici rovnic výše uvedených dějů. Vzhledem k tomu, že se jedná o děje rovinné (dvourozměrné), osově symetrické nebo obecně trojrozměrné a časově závislé, jsou popsány soustavou parciálních diferenciálních rovnic, které je nutné řešit numerickými metodami. Mezi metody řešení parciálních diferenciálních rovnic patří:

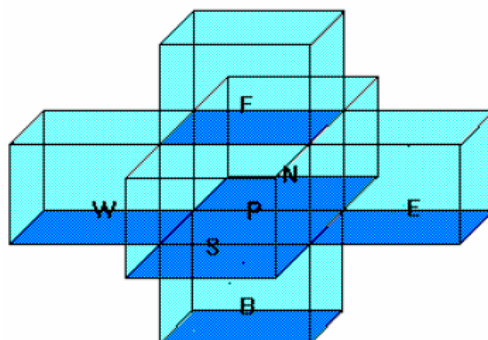
- ❖ diferenční metoda – spočívá v nahrazení derivací diferenčními podíly použitím Taylorova rozvoje
- ❖ metoda konečných objemů
- ❖ metoda konečných prvků
- ❖ spektrální metoda – vhodná pro periodické proudění v jednoduchých oblastech

**Metoda konečných objemů** spočívá ve třech základních bodech:

- ❖ dělení oblasti na diskrétní objemy užitím obecné křivočaré sítě
- ❖ bilancování neznámých veličin v individuálních konečných objemech a diskretizace
- ❖ numerické řešení diskretizovaných rovnic v obecném tvaru

$$\zeta_P \sum_i (A_i - S_P) = \sum_i A_i \zeta_i + S_C \quad (6.1)$$

kde součet se provede přes sousední buňky (v trojrozměrném případě  $i = N, S, E, W, F, B$ ).  $A_i$  jsou koeficienty, které obsahují příspěvky od konvektivních, difúzních a zdrojových členů a  $S_C$ ,  $S_P$  jsou složky linearizovaných zdrojových členů.



Obr. 6.1 Souřadnicové schéma,  $N$  – sever,  $S$  – jih,  $E$  – východ,  $W$  – západ,  $F$  – vpřed,  $B$  – vzad [10]

Fluent užitím non-staggered schématu definuje diskrétní konečné objemy, kdy všechny proměnné jsou uschovány ve středech konečných objemů (obr. 6.1).

Při řešení proudění pomocí programu Fluent je důležité získat konvergentní řešení. Mírou konvergence jsou reziduály, které představují maximální rozdíl dvou odpovídajících si veličin ve stejném bodě sítě ve dvou po sobě jdoucích iteracích. Snižující se hodnota reziduálu svědčí o dobře konvergující úloze. Každá iterace má následující sled:



Obr. 6.2 Diagram algoritmu řešení Fluentem [10]

Implicitně je ve Fluentu nastaven součet všech normalizovaných reziduálů na hodnotu  $10^{-3}$ . Po dosažení této hodnoty se ukončí výpočet. Přesnost řešení lze pak upravit tím, že se sníží hodnota součtu všech normalizovaných reziduálů, např. na  $10^{-4}$ . [4][10][15]

## 6.2 Definování matematického modelu axiálního hydrostatického ložiska

Ve fluidní vrstvě kluzného ložiska byl na základě výpočtu bezrozměrného podobnostního Reynoldsova čísla (4.3) definován laminární model proudění. Pracovní teplota kapaliny je udržována pomocí chladiče v rozmezí  $24^{\circ}\text{C} - 28^{\circ}\text{C}$ . Na základě tohoto předpokladu budu uvažovat proudění bez přestupu tepla při konstantní teplotě.

Proudění kapaliny v úzké mezeře axiálního hydrostatického ložiska je spojeno s řešením problému, který je definován jako:

- ❖ trojrozměrné proudění
- ❖ laminární proudění
- ❖ nestlačitelné proudění ( $\rho = \text{konst.}$ )
- ❖ izotermní proudění (bez uvažování přenosu tepla,  $T = \text{konst.}$ )
- ❖ stacionární proudění ( $\frac{\partial}{\partial t} = 0$ )
- ❖ proudění bez uvažování přenosu příměsí

## 6.3 Definování okrajových podmínek

V CFD programu Fluent lze definovat následující typy okrajových podmínek:

- ❖ podmínky pro vstup a výstup proudu
- ❖ podmínky na stěně
- ❖ podmínky symetrie
- ❖ periodické (cyklické) podmínky
- ❖ časově závislé okrajové podmínky

Ostatní okrajové podmínky se přímo netýkají proudění jako takového, ale dalších veličin vyplývajících ze složitosti matematického modelu, např. teplota, příměsi, hmotnostní zlomky apod.

## OKRAJOVÉ PODMÍNKY NA VSTUPU A VÝSTUPU

Na průtočných hranicích lze definovat tři typy okrajových podmínek, tj. vstup nebo výstup tlaku, vstup nebo výstup rychlosti (průtoku) a obecný výstup při nulovém gradientu (outlet). Při řešení matematického modelu axiálního hydrostatického ložiska jsem použil na vstupu okrajovou podmínku „Mass Flow Inlet“, kde definuji velikost hmotnostního průtoku na jednu mazací kapsu. Na výstupu jsem použil okrajovou podmínku „Pressure Outlet“, kde definuji velikost přetlaku, viz obr. 6.3.

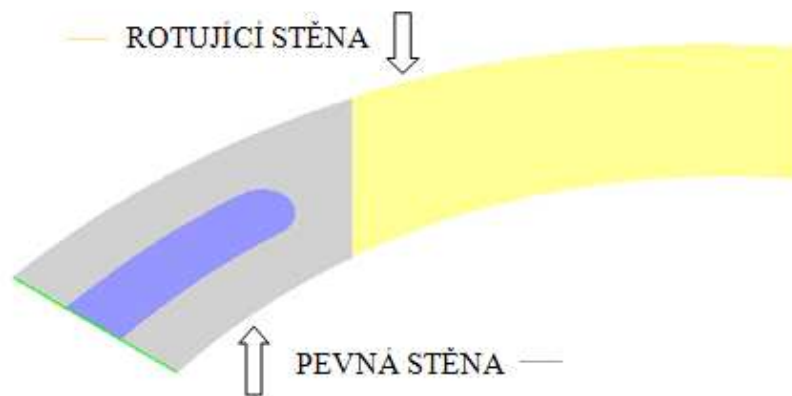


Obr. 6.3 Okrajové podmínky

## OKRAJOVÉ PODMÍNKY NA STĚNĚ

Stěna může být nepohyblivá (rychlost tekutiny je rovna nule), nebo pohyblivá (rotující nebo translační pohyb). Na stěně je možné nastavit teplotní podmínky pro přestup tepla, vyzařování tepla, smykové napětí, chemické reakce, rychlost, zda je stěna hladká nebo drsná, tření. V případě řešení matematického modelu axiálního hydrostatického ložiska je spodní část ložiska pevná nepohybující se stěna (obr. 6.4) a horní část vykonává rotační pohyb, kde definuji velikost otáček.





Obr. 6.4 Okrajové podmínky na stěně

## PERIODICKÉ (CYKlickÉ) OKRAJOVÉ PODMÍNKY

Používají se pro opakující se proudové útvary. Mohou být translačního nebo rotačního typu. V případě kluzného ložiska (obr. 6.3) je použita rotační periodická okrajová podmínka. Díky této podmínce nemusíme generovat celou geometrii fluidní vrstvy, ale stačí pouze  $\frac{1}{6}$  objemu. [4][10][15]

## 6.4 Konstrukční návrhy axiálního hydrostatického ložiska

Na základě zadání a cílů diplomové práce byly definovány následující konstrukční varianty hydrostatického ložiska:

- ❖ **VARIANTA 1:** základní tvar a rozměry podle výkresové dokumentace firmy Interfluid spol. s r.o. (obr. 5.4). Uvažuje se původní hydraulický agregát s celkovým objemovým průtokem  $Q_{V1} = 35,2 \text{ L.min}^{-1}$  a pracovním tlakem  $3 \text{ MPa}$ .
- ❖ **VARIANTA 2:** základní tvar a rozměry podle výkresové dokumentace firmy Interfluid spol. s r.o. (obr. 5.4). Uvažuje se výkonnější hydraulický agregát s celkovým objemovým průtokem  $Q_{V2} = 50 \text{ L.min}^{-1}$  a pracovním tlakem  $4,5 \text{ MPa}$ .
- ❖ **VARIANTA 3:** konstrukční úprava mazací kapsy axiálního hydrostatického ložiska zmenšením šířky kapsy, viz obr. 7.6.
- ❖ **VARIANTA 4:** konstrukční úprava mazací kapsy axiálního hydrostatického ložiska zmenšením šířky kapsy, viz obr. 7.8.

- ❖ **VARIANTA 5:** konstrukční úprava vyvíjecí drážky axiálního hydrostatického ložiska změnou tvaru, viz obr. 7.13.
- ❖ **VARIANTA 6:** konstrukční úprava vyvíjecí drážky axiálního hydrostatického ložiska změnou tvaru obr. 7.16.
- ❖ **VARIANTA 7:** změna otáček otočné desky stolu z  $n = 40 \text{ min}^{-1}$  na  $n = 20 \text{ min}^{-1}$  a  $n = 0,1 \text{ min}^{-1}$  pro varianty 4, 5 a 6.

## 7 APLIKACE MATEMATICKÉHO MODELU NA AXIÁLNÍ HYDROSTATICKÉ LOŽISKO

### 7.1 VARIANTA 1

Základní tvar a rozměry výpočetní oblasti byly vytvořeny podle výkresové dokumentace firmy Interfluid spol. s r.o. (obr. 5.4). Zdrojem tlakové kapaliny je původní hydraulický agregát s celkovým objemovým průtokem  $Q_{v1} = 35,2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$  a pracovním tlakem  $3 \text{ MPa}$ , viz kap. 3.1. Hlavním účelem definování vytvořené varianty řešení je prokázat správnost zvolení hydraulického agregátu s větším výkonem a ověření definovaného matematického modelu.

Postup vytvoření výpočetní sítě pomocí systému Gambit je uveden v kap. 5.2.1. Matematický model axiálního hydrostatického ložiska byl definován v programu Fluent, viz kap. 6.2.

#### Definování okrajových podmínek matematického modelu:

- ❖ na vstupu byl nastaven hmotnostní průtok pro jednu mazací kapsu

$$Q_{m1} = \frac{Q_{v1} \cdot \rho}{6} \quad (7.1)$$

$$Q_{m1} = \frac{586,6 \cdot 10^{-6} \cdot 874}{6} = 0,085458 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

kde celkový objemový průtok  $Q_{v1} = 35,2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1} = 588,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

- ❖ na výstupu byla definována hodnota přetlaku  $p = 0 \text{ Pa}$

❖ na rotující stěně jsou definovány konstantní otáčky  $n = 40 \text{ min}^{-1} = 0,6666 \text{ s}^{-1}$ .

Vyhodnocením numerické simulace jsem získal konvergentní řešení, kdy jsem vyhodnotil velikost statického tlaku a únosnost ložiska pro danou tloušťku mezery  $h$  (Tab. 7.1). První výpočet byl proveden pro tloušťku mezery  $h = 0,05 \text{ mm}$ . Statický tlak mnohonásobně přesahuje daný pracovní tlak v ložisku. Kluzné ložisko při tloušťce mezery  $h = 0,1 \text{ mm}$  má vysokou únosnost, ale má značný maximální statický tlak. Pro ostatní tloušťky mezery  $h = (0,11 - 0,15) \text{ mm}$  je patrná nízká únosnost axiálního hydrostatického ložiska.

**Tab. 7.1** Tabulka vypočtených hodnot – VARIANTA 1

Tloušťka mezery $h$ [mm]	Únosnost ložiska $F$ [N]	Střední statický tlak $p$ [MPa]	Maximální statický tlak $p_{\max}$ [MPa]	Minimální statický tlak $p_{\min}$ [MPa]
0,05	2 648 603	50,3	63,1	28,9
0,1	331 704	6,303	7,9	3,6
0,11	249 234	4,74	5,93	2,73
0,12	192 012	3,65	4,57	2,1
0,13	151 033	2,87	3,6	1,65
0,14	120 959	2,3	2,88	1,32
0,15	98 350	1,87	2,3	1,1

Varianta 1 axiálního hydrostatického ložiska s danými rozměry a velikostí hydraulického agregátu nedokáže vytvořit dostatečnou vůli pro otáčení desky otočného stolu, která by měla vyhovující únosnost. Řešením je zvolení hydraulického agregátu s větším výkonem.

## 7.2 VARIANTA 2

Varianta 2 má základní tvar a rozměry výpočetní oblasti vytvořené podle výkresové dokumentace firmy Interfluid spol. s r.o. (obr. 5.4). Byl použit nový hydraulický agregát s celkovým objemovým průtokem  $Q_{V2} = 50 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$  a pracovním tlakem  $4,5 \text{ MPa}$ , viz kap. 3.1. Výsledkem této varianty řešení by mělo být prokázání správnosti volby vhodného hydraulického agregátu pro příslušnou konstrukci kluzného ložiska.

Postup vytvoření výpočetní sítě pomocí systému Gambit je uveden v kap. 5.2.1. Matematický model axiálního hydrostatického ložiska byl definován v programu Fluent, viz kap. 6.2.

### Definování okrajových podmínek matematického modelu:

- ❖ na vstupu byl nastaven hmotnostní průtok pro jednu mazací kapsu

$$Q_{m2} = \frac{Q_{V2} \cdot \rho}{6} \quad (7.2)$$

$$Q_{m2} = \frac{833,3 \cdot 10^{-6} \cdot 874}{6} = 0,121384 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

kde celkový objemový průtok  $Q_{V2} = 50 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1} = 833,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

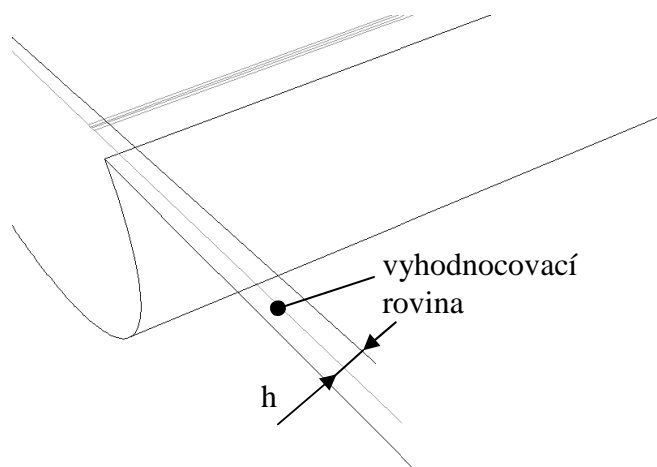
- ❖ na výstupu byla definována hodnota přetlaku  $p = 0 \text{ Pa}$
- ❖ na rotující stěně jsou definovány konstantní otáčky  $n = 40 \text{ min}^{-1} = 0,6666 \text{ s}^{-1}$ .

Numerickou simulací jsem vyhodnotil (Tab. 7.2) únosnost ložiska, střední statický tlak, maximální a minimální tlak na vstupu pro tloušťku mezery  $h = (0,1 - 0,15) \text{ mm}$ . Jinou tloušťku fluidní vrstvy nemá pro zadané parametry význam vyhodnocovat. Při plném zatížení axiálního hydrostatického ložiska silou  $F = 300\,000 \text{ N}$  nepatrně vzroste střední tlak nad hodnotu pracovního tlaku. Čerpadlo však dokáže vzniklé přetížení vyrovnat. Výkonnější hydraulický agregát vytvoří dostatečnou vůli pro otáčení desky otočného stolu při maximálním zatížení.

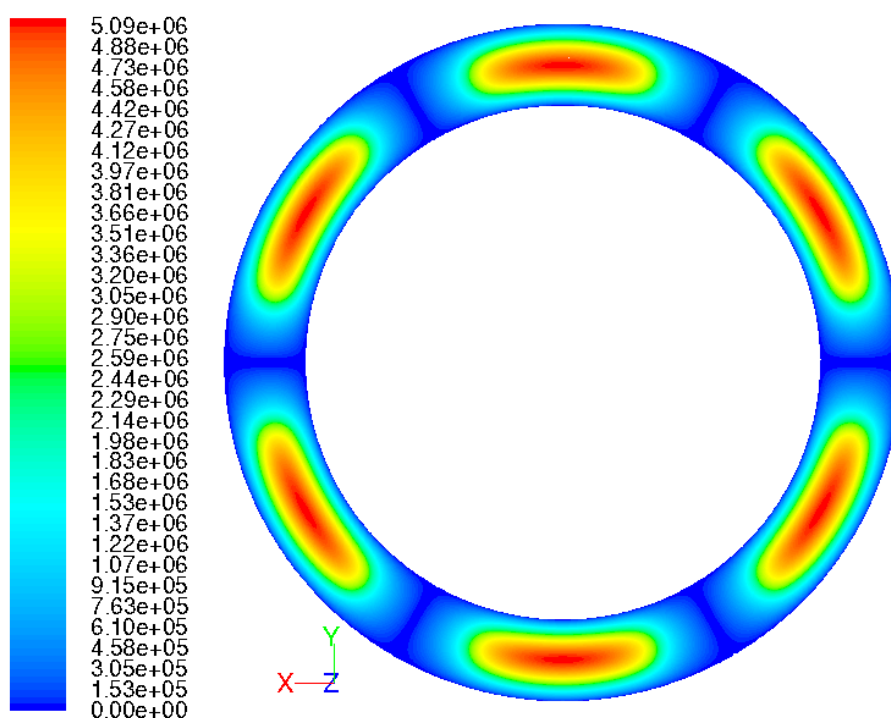
**Tab. 7.2** Tabulka vypočtených hodnot – VARIANTA 2

Tloušťka mezery h [mm]	Únosnost ložiska F [N]	Střední statický tlak p [MPa]	Maximální statický tlak p <sub>max</sub> [MPa]	Minimální statický tlak p <sub>min</sub> [MPa]
0,1	469 017	8,91	11,2	5,13
0,11	352 443	6,7	8,4	3,9
0,12	271 528	5,16	6,47	2,97
0,13	213 641	4,06	5,09	2,34
0,14	171 014	3,25	4,07	1,87
0,15	139 087	2,64	3,31	1,52

Pro zobrazení grafických výstupů jednotlivých variant řešení jsem vytvořil vyhodnocovací rovinu, která se nachází v polovině tloušťky mezery (obr. 7.1).



Obr. 7.1 Zobrazení vyhodnocovací roviny

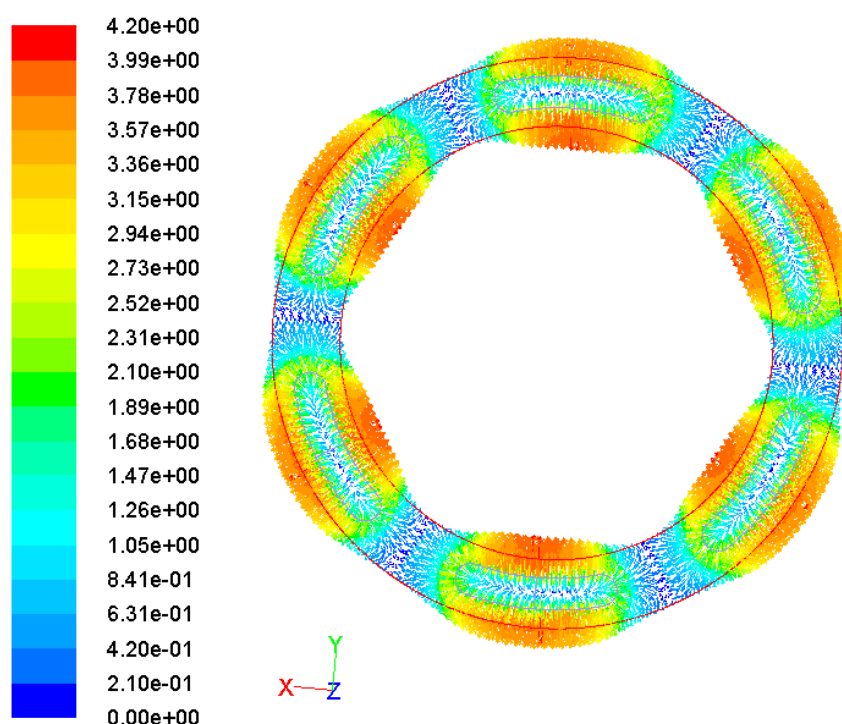


Obr. 7.2 Tlakové pole ve vyhodnocovací rovině axiálního hydrostatického ložiska, tloušťka mezery  $h = 0,13 \text{ mm}$

Na obr. 7.2 je zobrazeno rozložení statického tlakového pole ve vyhodnocovací rovině (obr. 7.1) v axiálním hydrostatickém ložisku pro tloušťku mezery  $0,13 \text{ mm}$  (grafické výstupy pro ostatní varianty řešení jsou v příloze A). Z obrázku je patrné, že maximální velikost statického tlaku je na vstupu do ložiska (znázorněna červeně). Všechny mazací

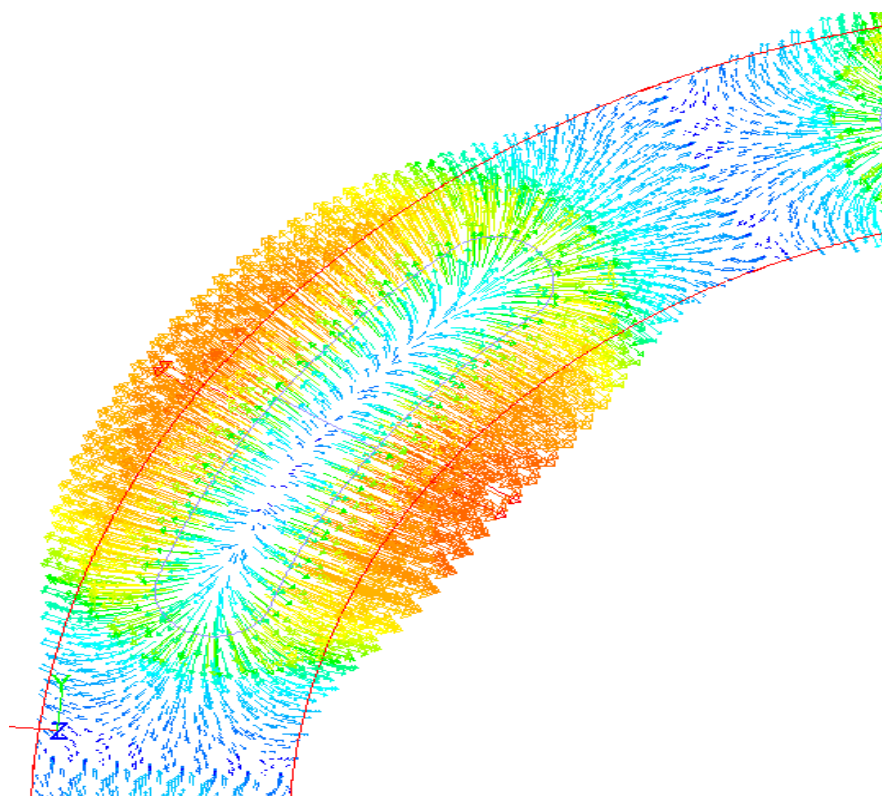
kapsy mají stejné rozložení tlakového pole, neboť jsou odděleny vyvíjecími drážkami, aby se navzájem neovlivňovaly. V oblasti vyvíjecích drážek se blíží statický tlak nulové hodnotě (tmavě modrá).

Na obr. 7.3 a 7.4 je zobrazeno rozložení vektorů velikosti rychlosti ve vyhodnocovací rovině (obr. 7.1) v axiálním hydrostatickém ložisku pro tloušťku mezery  $0,13\text{ mm}$ . Olej je přiveden na vstup, kde se rovnoměrně rozlije v mazací kapse a poté se rozlije po celém ložisku. Kapalina může proudit všemi směry v dané rovině a současně si vybírá cestu nejmenšího odporu.

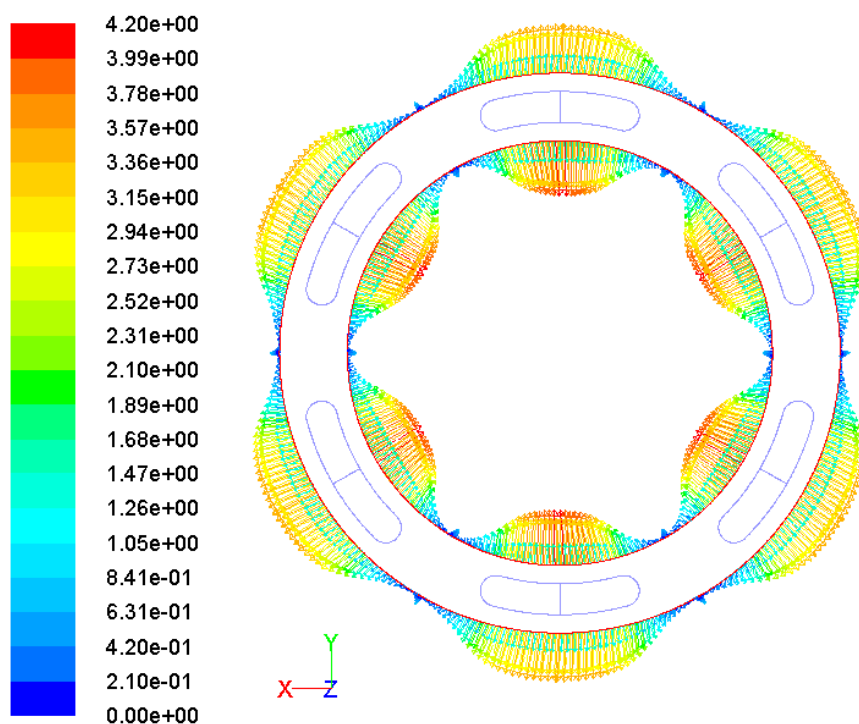


Obr. 7.3 Zobrazení vektorů velikosti rychlosti v axiálním hydrostatickém ložisku, tloušťka mezery  $h = 0,13\text{ mm}$

Zobrazení rychlostního pole na výstupu z axiálního hydrostatického ložiska pro tloušťku mezery  $0,13\text{ mm}$  je na obr. 7.5. Maximální velikost rychlosti se nachází v oblasti mazací kapsy (zobrazeno červeně) na výstupu z ložiska. Rychlostní pole po obvodu má harmonický průběh. Rovnoměrně klesá směrem k vyvíjecí drážce a přibližuje se k nulové hodnotě (tmavě modrá).



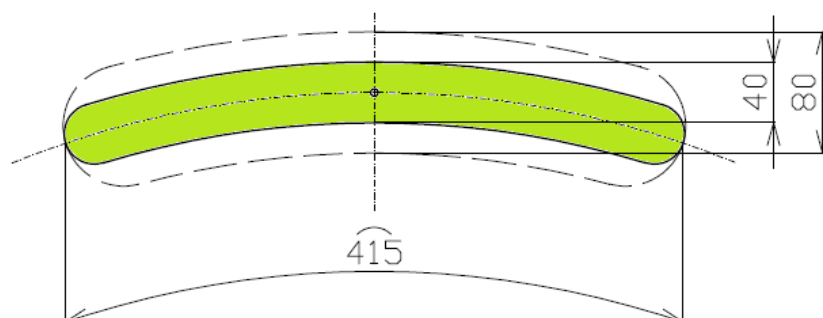
Obr. 7.4 Detail zobrazení velikosti vektorů rychlosti v axiálním hydrostatickém ložisku, tloušťka mezery  $h = 0,13 \text{ mm}$ ,  $u_{MAX} = 4,2 \text{ m.s}^{-1}$



Obr. 7.5 Zobrazení rychlostního pole na výstupu v axiálním hydrostatickém ložisku, tloušťka mezery  $h = 0,13 \text{ mm}$

### 7.3 VARIANTA 3

Varianta 3 se liší od varianty 2 (kap. 7.2) konstrukční úpravou mazací drážky axiálního hydrostatického ložiska. Změna se týká zmenšení šířky kapsy z 80 mm na 40 mm (obr. 7.6) a zároveň se tím změní velikost vstupní plochy.



Obr. 7.6 Konstrukční úprava mazací drážky

Postup vytvoření výpočetní sítě pomocí systému Gambit je uveden v kap. 5.2.1. Matematický model axiálního hydrostatického ložiska byl definován v programu Fluent, viz kap. 6.2. Okrajové podmínky matematického modelu jsou definovány v kapitole 7.2.

Vyhodnocením numerické simulace (Tab. 7.3) jsem získal konvergentní řešení pro tloušťku fluidní vrstvy  $h = (0,1 - 0,15) \text{ mm}$ . Zmenšením vstupní plochy kluzného ložiska došlo ke zvýšení velikosti únosnosti a středního statického tlaku na vstupu do ložiska při dané tloušťce mezery.

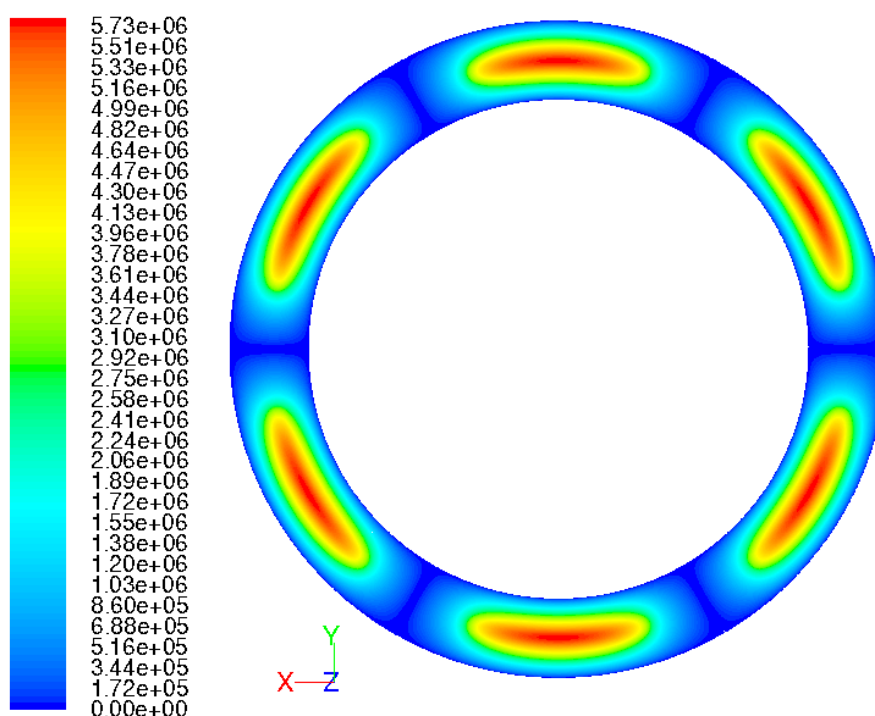
Tab. 7.3 Tabulka vypočtených hodnot – VARIANTA 3

Tloušťka mezery $h$ [mm]	Únosnost ložiska $F$ [N]	Střední statický tlak $p$ [MPa]	Maximální statický tlak $p_{\max}$ [MPa]	Minimální statický tlak $p_{\min}$ [MPa]
0,1	493 260	10,7	12,6	6
0,11	370 776	8,06	9,47	4,52
0,12	285 672	6,21	7,29	3,48
0,13	224 584	4,88	5,74	2,74
0,14	179 892	3,91	4,59	2,19
0,15	146 350	3,18	3,74	1,78

Tlakové pole v axiálním hydrostatickém ložisku pro tloušťku mezery  $0,13 \text{ mm}$  je zobrazeno na obr. 7.7 (grafické výstupy pro ostatní varianty řešení jsou v příloze B). Maximální velikost statického tlaku se nachází v oblasti mazací drážky (znázorněna červeně). V porovnání s variantou 2 se maximální statický tlak zvýšil z  $5,09 \text{ MPa}$  na



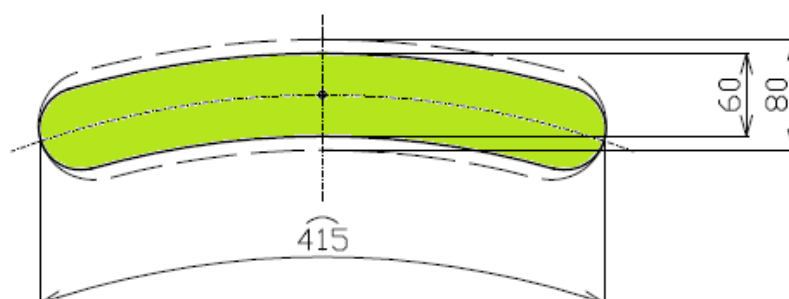
5,74 MPa . Všechny mazací kapsy mají stejné rozložení tlakového pole, neboť jsou odděleny vyvíjecími drážkami, aby se navzájem neovlivňovaly. V oblasti vyvíjecích drážek se blíží statický tlak nulové hodnotě (tmavě modrá).



Obr. 7.7 Tlakového pole v axiálním hydrostatickém ložisku, tloušťka mezery  $h = 0,13 \text{ mm}$

## 7.4 VARIANTA 4

Varianta 4 se liší od varianty 2 (kap. 7.2) konstrukční úpravou mazací drážky axiálního hydrostatického ložiska. Změna se týká zmenšení šířky kapsy z 80 mm na 60 mm (obr. 7.6) a zároveň se tím změní velikost vstupní plochy.



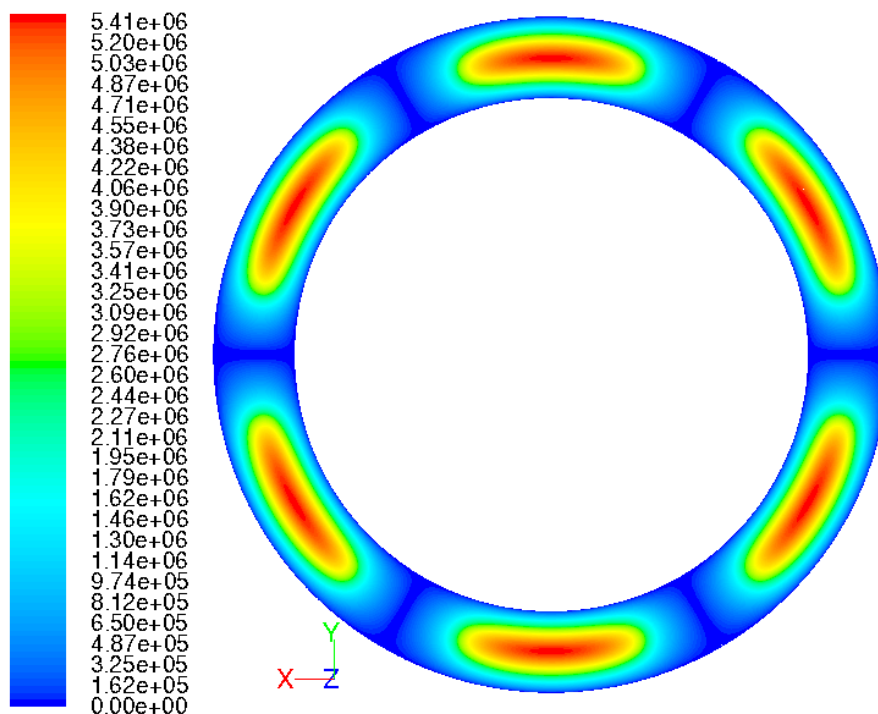
Obr. 7.8 Konstrukční úprava mazací drážky

Postup vytvoření výpočetní sítě pomocí systému Gambit je uveden v kap. 5.2.1. Matematický model axiálního hydrostatického ložiska byl definován v programu Fluent, viz kap. 6.2. Okrajové podmínky matematického modelu jsou definovány v kapitole 7.2.

Matematický model byl vyhodnocen (Tab. 7.4) pro tloušťku mezery  $h = (0,1 - 0,15) \text{ mm}$ . Při tloušťce fluidní vrstvy  $h = 0,13 \text{ mm}$  je střední statický tlak roven pracovní tlaku hydraulického agregátu ( $4,5 \text{ MPa}$ ). Vzniklé řešení bude bráno jako „referenční“ pro další konstrukční úpravy axiálního hydrostatického ložiska.

**Tab. 7.4** Tabulka vypočtených hodnot – VARIANTA 4

Tloušťka mezery $h$ [mm]	Únosnost ložiska $F$ [N]	Střední statický tlak $p$ [MPa]	Maximální statický tlak $p_{\max}$ [MPa]	Minimální statický tlak $p_{\min}$ [MPa]
0,1	483 218	9,82	11,89	5,52
0,11	363 101	7,38	8,94	4,15
0,12	279 669	5,68	6,88	3,19
0,13	219 974	4,47	5,41	2,51
0,14	176 148	3,58	4,34	2,01
0,15	143 213	2,91	3,52	1,64



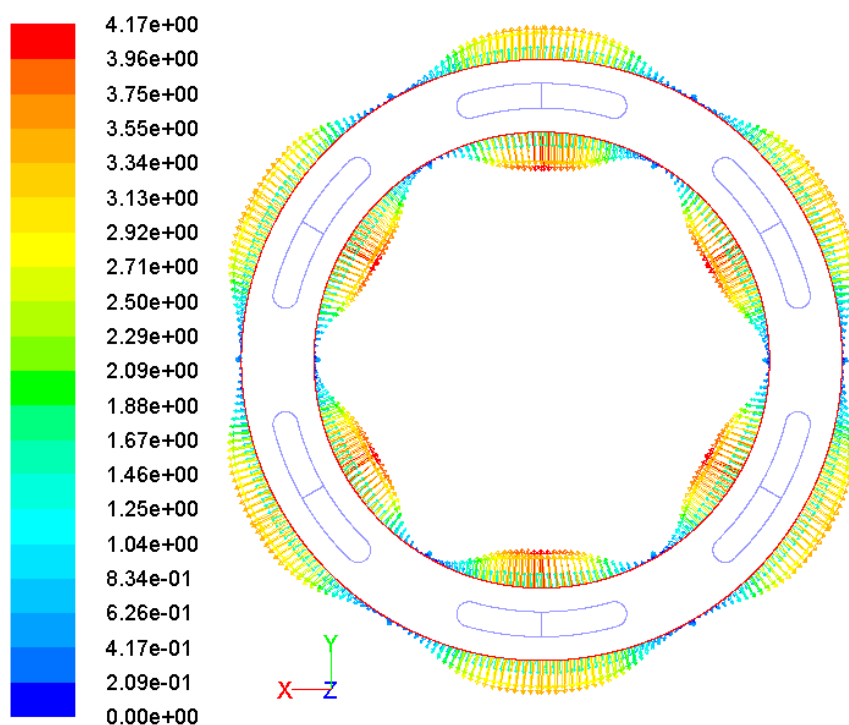
*Obr. 7.9* Tlakové pole v axiálním hydrostatickém ložisku, tloušťka mezery  $h = 0,13 \text{ mm}$

Na obr. 7.9 je zobrazeno rozložení tlakového pole v axiálním hydrostatickém ložisku pro tloušťku mezery  $0,13\text{ mm}$  (grafické výstupy pro ostatní varianty řešení jsou v příloze C). V porovnání s variantou 2 se maximální statický tlak zvýšil z  $5,09\text{ MPa}$  na  $5,41\text{ MPa}$ .

Rychlostní pole na výstupu z axiálního hydrostatického ložiska, pro tloušťku mezery  $0,13\text{ mm}$ , je zobrazeno na obr. 7.10. Kapalina má maximální rychlost v oblasti mazací drážky (zobrazeno červeně) na výstupu z ložiska. Rychlostní pole má po obvodu harmonický průběh. Rovnoměrně klesá směrem k vyvíjecí drážce a přibližuje se k nulové hodnotě (tmavě modrá).

Rozsah velikosti rychlosti:

- ❖ maximální velikost rychlosti -  $u_{MAX} = 4,17\text{ m.s}^{-1}$
- ❖ minimální velikost rychlosti -  $u_{MIN} = 0,00124\text{ m.s}^{-1}$

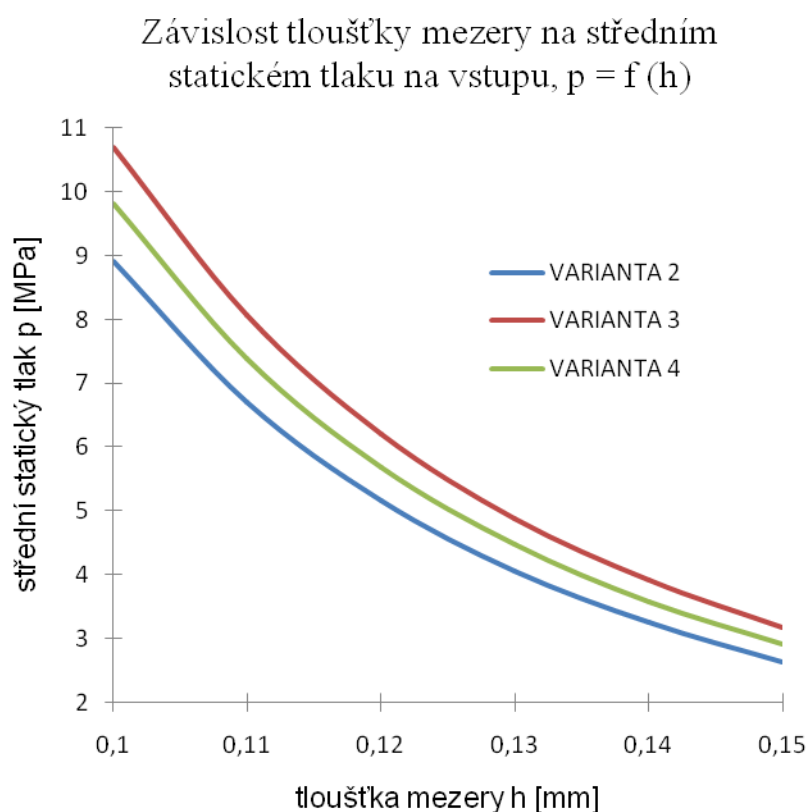


Obr. 7.10 Zobrazení rychlostního pole na výstupu v axiálním hydrostatickém ložisku, tloušťka mezery  $h = 0,13\text{ mm}$

## Vyhodnocení závislosti tloušťky mezery na středním statickém tlaku a únosnosti ložiska pro varianty 2, 3 a 4

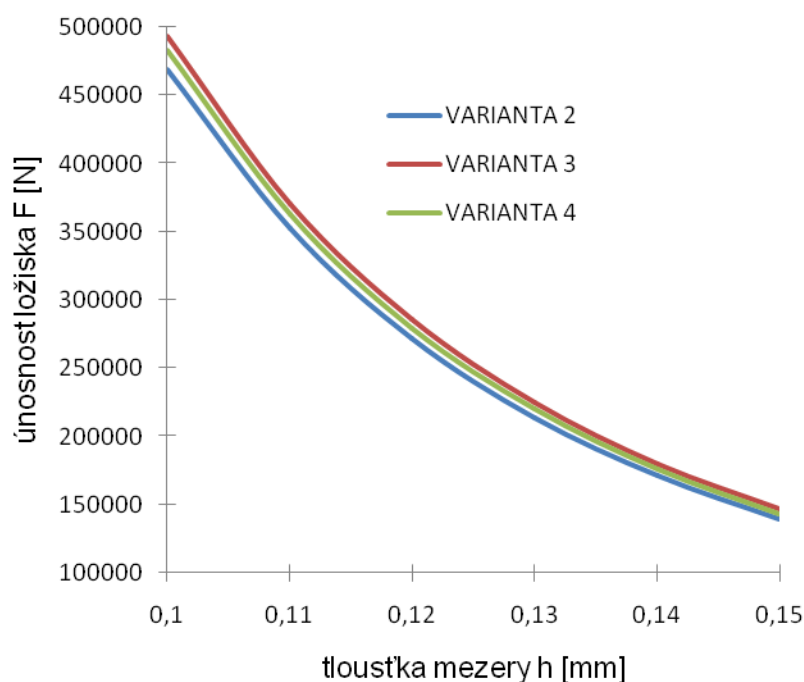
Při změně tloušťky mezery se mění velikost středního statického tlaku na vstupu axiálního hydrostatického ložiska (obr. 7.11). Z grafu je patrné, že s rostoucí velikostí mezery klesá střední statický tlak. Varianta 2 má nejmenší tlak při dané tloušťce mezery a varianta 3 má tlak největší. Varianta 4 se pohybuje uprostřed obou předchozích variant. Jednotlivé varianty se liší velikostí vstupní plochy v kluzném ložisku a z toho lze usoudit, že s klesající velikostí plochy na vstupu roste velikost středního statického tlaku.

Analogicky lze odvodit závislost změny tloušťky mezery na únosnosti axiálního hydrostatického ložiska (obr. 7.12). S rostoucí velikostí fluidní vrstvy klesá únosnost ložiska. S rostoucí velikostí vstupní plochy klesá únosnost ložiska při konstantní tloušťce mezery.



Obr. 7.11 Graf závislosti tloušťky mezery na středním statickém tlaku na vstupu

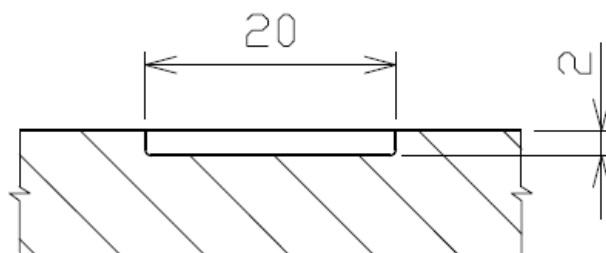
### Závislost tloušťky mezery na únosnosti ložiska, $F = f(h)$



Obr. 7.12 Graf závislosti tloušťky mezery na únosnosti ložiska

## 7.5 VARIANTA 5

Varianta 5 se liší od varianty 4 (kap. 7.4) konstrukční úpravou vyvíjecí drážky axiálního hydrostatického ložiska (obr. 7.13). Tvar vyvíjecí drážky má obdélníkový průřez. Konstrukční úpravou ložiska se předpokládá snížení rychlosti v oblasti vyvíjecí drážky a tím snížení ovlivnitelnosti jednotlivých mazacích kapes v axiálním hydrostatickém ložisku.



Obr. 7.13 Konstrukční úprava vyvíjecí drážky

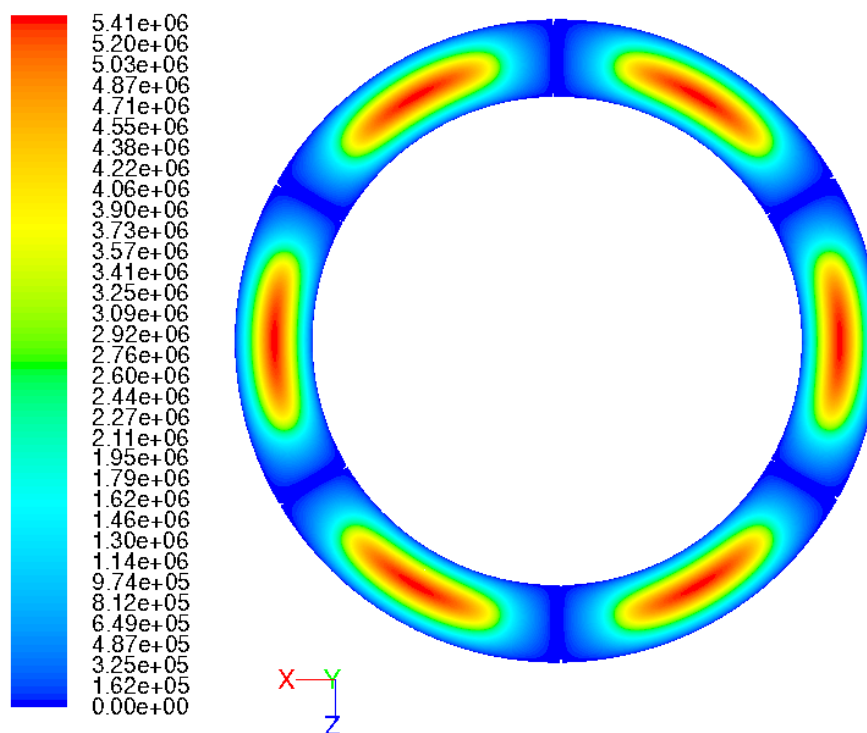
Postup vytvoření výpočetní sítě pomocí systému Gambit je uveden v kap. 5.2.1. Matematický model axiálního hydrostatického ložiska byl definován v programu Fluent, viz kap. 6.2. Okrajové podmínky matematického modelu jsou definovány v kapitole 7.2.

Matematický model byl vyhodnocen (Tab. 7.5) pro tloušťku fluidní vrstvy  $h = 0,13 \text{ mm}$ . V porovnání s variantou 4 se nezměnila velikost statického tlaku na vstupu a nepatrně se snížila únosnost ložiska z 219 974 N na 219 230 N.

**Tab. 7.5** Tabulka vypočtených hodnot – VARIANTA 5

Tloušťka mezery $h$ [mm]	Únosnost ložiska $F$ [N]	Střední statický tlak $p$ [MPa]	Maximální statický tlak $p_{\max}$ [MPa]	Minimální statický tlak $p_{\min}$ [MPa]
0,13	219 230	4,47	5,41	2,51

Na obr. 7.14 je zobrazeno rozložení tlakového pole v axiálním hydrostatickém ložisku pro tloušťku mezery  $0,13 \text{ mm}$ . Z obrázku je patrné, že má stejné rozložení tlaku jako varianta 4, kde maximální velikost statického tlaku je v oblasti mazacích drážek. V oblasti vyvíjecích drážek se blíží statický tlak nulové hodnotě.



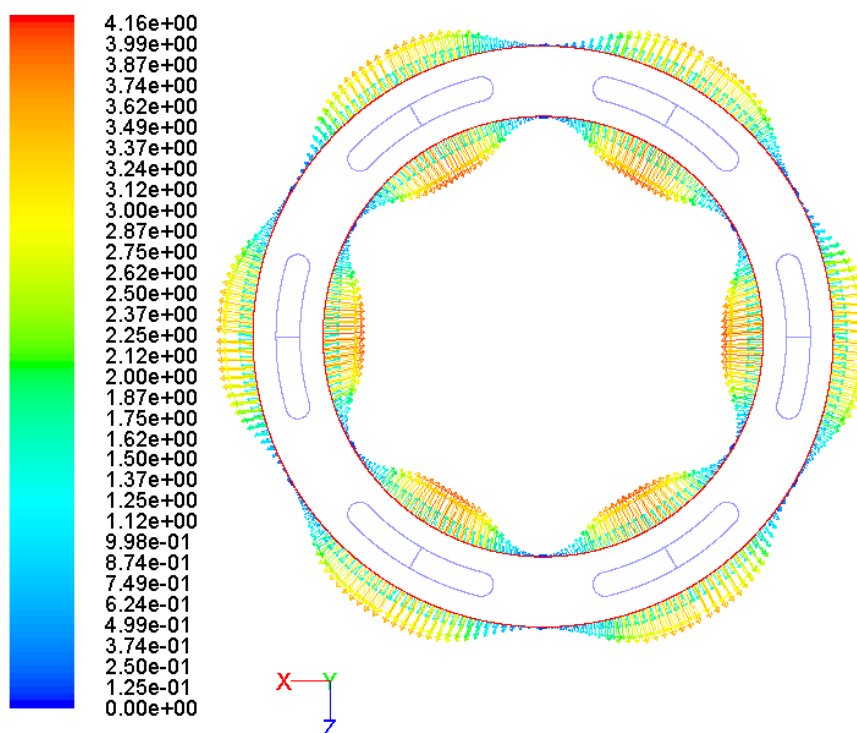
**Obr. 7.14** Tlakové pole v axiálním hydrostatickém ložisku, tloušťka mezery  $h = 0,13 \text{ mm}$

Zobrazení rychlostního pole na výstupu z axiálního hydrostatického ložiska, pro tloušťku mezery  $0,13 \text{ mm}$ , je na obr. 7.15. Rozložení rychlostního pole je stejné jako u varianty 4, maximální rychlost se nachází v oblasti mazací kapsy na výstupu z ložiska a postupně klesá směrem k vyvíjecí drážce, kde se přibližuje k nulové hodnotě. V oblasti

vyvíjecí drážky se výrazně snížila velikost rychlosti ( $3,35 \cdot 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$ ) v porovnání s variantou 4 ( $0,00124 \text{ m.s}^{-1}$ ).

Rozsah velikosti rychlosti:

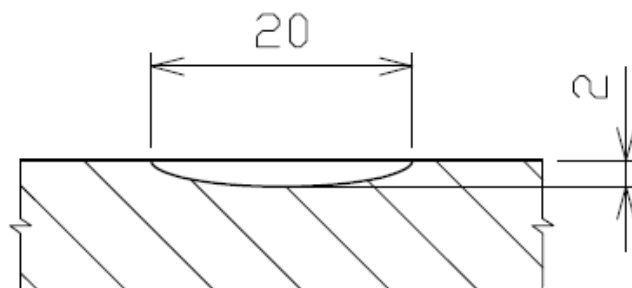
- ❖ maximální velikost rychlosti -  $u_{MAX} = 4,1599 \text{ m.s}^{-1}$
- ❖ minimální velikost rychlosti -  $u_{MIN} = 3,35 \cdot 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$



Obr. 7.15 Zobrazení rychlostního pole na výstupu v axiálním hydrostatickém ložisku, tloušťka mezery  $h = 0,13 \text{ mm}$

## 7.6 VARIANTA 6

Varianta 6 se liší od varianty 4 (kap. 7.4) konstrukční úpravou vyvíjecí drážky axiálního hydrostatického ložiska (obr. 7.16). Vyvíjecí drážka má v řezu tvar poloviny paraboly. Konstrukční úpravou ložiska se předpokládá snížení rychlosti v oblasti vyvíjecí drážky a tím snížení ovlivnitelnosti jednotlivých mazacích kapes v axiálním hydrostatickém ložisku.



Obr. 7.16 Konstrukční úprava vyvíjecí drážky

Postup vytvoření výpočetní sítě pomocí systému Gambit je uveden v kap. 5.2.1. Matematický model axiálního hydrostatického ložiska byl definován v programu Fluent, viz kap. 6.2. Okrajové podmínky matematického modelu jsou definovány v kapitole 7.2.

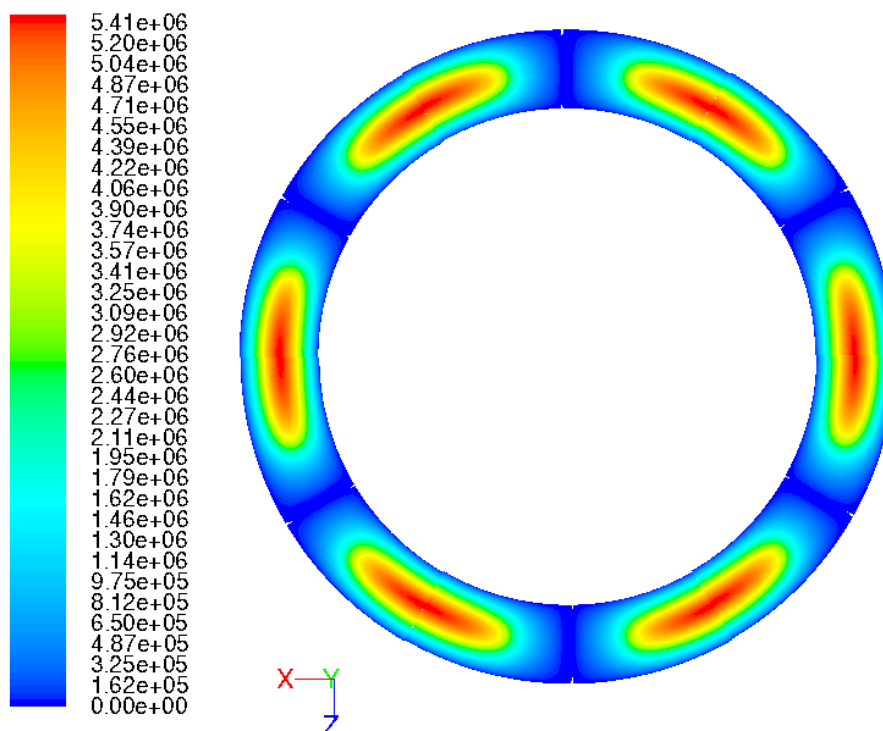
Matematický model jsem vyhodnotil (Tab. 7.6) pro tloušťku fluidní vrstvy  $h = 0,13 \text{ mm}$ . V porovnání s variantou 4 se nezměnila velikost statického tlaku na vstupu a nepatrně se snížila únosnost ložiska z 219 974 N na 219 368 N.

Tab. 7.6 Tabulka vypočtených hodnot – VARIANTA 6

Tloušťka mezer $h$ [mm]	Únosnost ložiska $F$ [N]	Střední statický tlak $p$ [MPa]	Maximální statický tlak $p_{\max}$ [MPa]	Minimální statický tlak $p_{\min}$ [MPa]
0,13	219 368	4,47	5,41	2,51



Grafické vyhodnocení statického tlakového pole je na obr. 7.17. Rozložení tlaku je stejné jako u varianty 4.

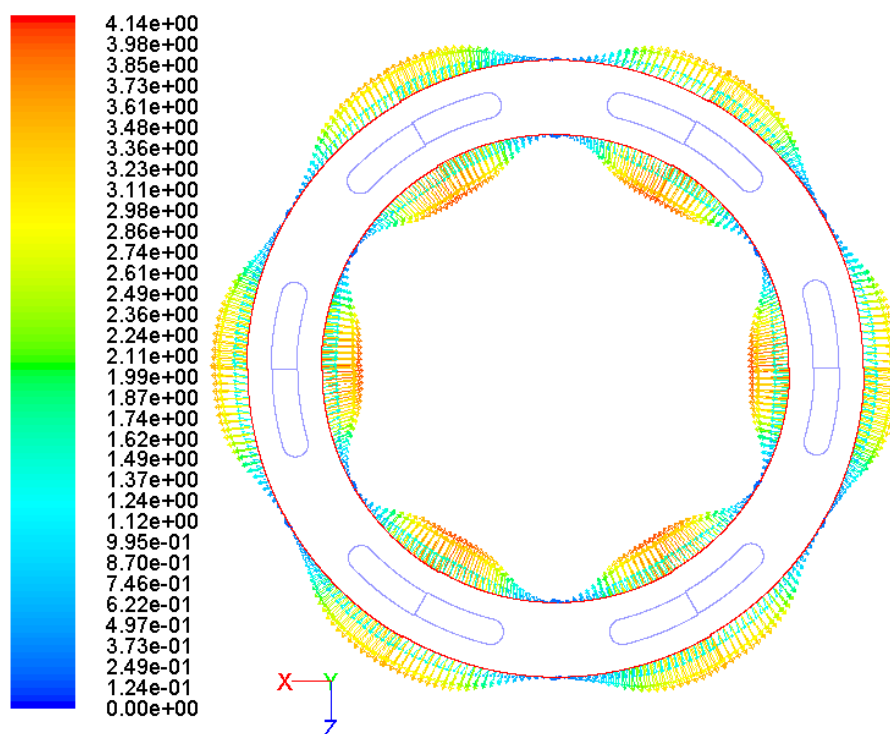


Obr. 7.17 Tlakové pole v axiálním hydrostatickém ložisku, tloušťka mezery  $h = 0,13 \text{ mm}$

Rychlostní pole axiálního hydrostatického ložiska (obr. 7.18) má maximální velikost rychlosti v oblasti mazací drážky na výstupu z ložiska. Rovnoměrně klesá směrem k vyvíjecí drážce a přibližuje se k nulové hodnotě. Varianta 6 má menší velikost rychlosti v oblasti vyvíjecí drážky než varianta 4. Porovnáním variant 5 a 6 lze usoudit, že varianta 5 má nižší velikost rychlosti v oblasti vyvíjecí drážky. S klesající rychlostí kapaliny v dané oblasti klesá ovlivnitelnost mazacích kapes axiálního hydrostatického ložiska.

Rozsah velikosti rychlosti:

- ❖ maximální velikost rychlosti -  $u_{MAX} = 4,1446 \text{ m.s}^{-1}$
- ❖ minimální velikost rychlosti -  $u_{MIN} = 0,0084 \text{ m.s}^{-1}$



Obr. 7.18 Zobrazení rychlostního pole na výstupu v axiálním hydrostatickém ložisku, tloušťka mezery  $h = 0,13 \text{ mm}$

## 7.7 VARIANTA 7

U předchozích variant byly definovány konstantní otáčky  $n = 40 \text{ min}^{-1}$ . Při obrábění se však otáčky mění podle způsobu opracování (hrubování, hlazení) a podle typu zvoleného obrobku. Ve variantě 7 budu vyhodnocovat změnu otáček. Pro pokrytí celého rozsahu budu uvažovat otáčky  $n = 0,1 \text{ min}^{-1}$  a  $n = 20 \text{ min}^{-1}$ . Vyhodnocení změny otáček bude provedeno pro varianty 4, 5 a 6.

Postup vytvoření výpočetní sítě pomocí systému Gambit je uveden v kap. 5.2.1. Matematický model axiálního hydrostatického ložiska byl definován v programu Fluent, viz kap. 6.2.

**Definování okrajových podmínek matematického modelu** (viz kap. 7.2):

- ❖ na rotující stěně jsou definovány otáčky  $n = 0,1 \text{ min}^{-1} = 0,001667 \text{ s}^{-1}$  až  $n = 20 \text{ min}^{-1} = 0,3333 \text{ s}^{-1}$ .

## Vyhodnocení matematického modelu

Tab. 7.7 Tabulka vypočtených hodnot při změně otáček – VARIANTA 4

Tloušťka mezery $h$ [mm]	Únosnost ložiska $F$ [N]	Střední statický tlak $p$ [MPa]	Maximální statický tlak $p_{\max}$ [MPa]	Minimální statický tlak $p_{\min}$ [MPa]	Otáčky $n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]
0,13	219 965	4,47	5,41	2,51	20
0,13	219 959	4,47	5,41	2,51	0,1

Tab. 7.8 Tabulka vypočtených hodnot při změně otáček – VARIANTA 5

Tloušťka mezery $h$ [mm]	Únosnost ložiska $F$ [N]	Střední statický tlak $p$ [MPa]	Maximální statický tlak $p_{\max}$ [MPa]	Minimální statický tlak $p_{\min}$ [MPa]	Otáčky $n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]
0,13	219 309	4,47	5,41	2,51	20
0,13	219 279	4,47	5,41	2,51	0,1

Tab. 7.9 Tabulka vypočtených hodnot při změně otáček – VARIANTA 6

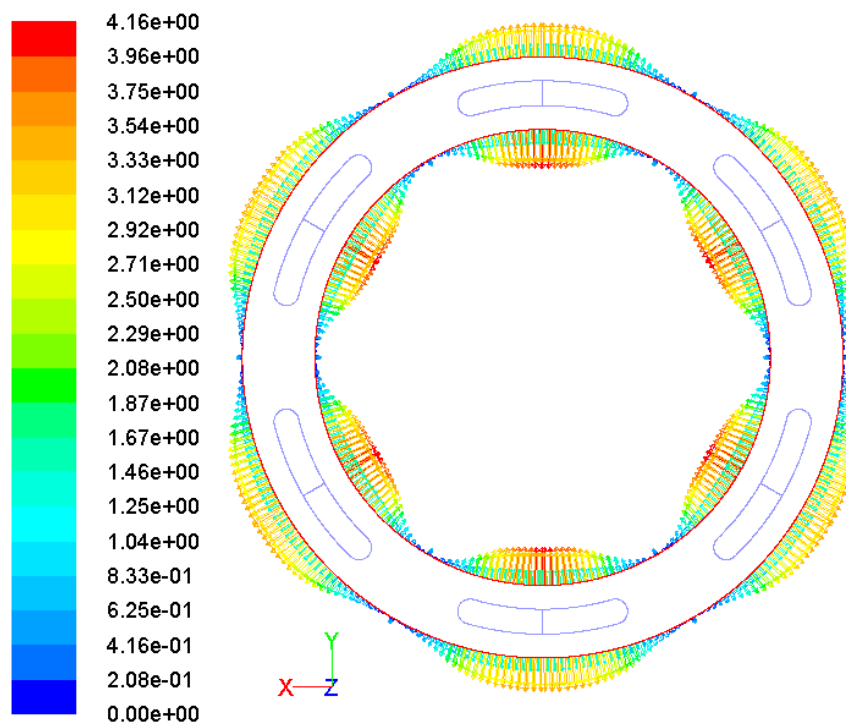
Tloušťka mezery $h$ [mm]	Únosnost ložiska $F$ [N]	Střední statický tlak $p$ [MPa]	Maximální statický tlak $p_{\max}$ [MPa]	Minimální statický tlak $p_{\min}$ [MPa]	Otáčky $n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]
0,13	219 393	4,47	5,41	2,51	20
0,13	219 308	4,47	5,41	2,51	0,1

Vyhodnocením matematického modelu variant 4, 5 a 6 (Tab. 7.7, 7.8, 7.9) jsem získal konvergentní řešení pro tloušťku mezery  $h = 0,13 \text{ mm}$ . Z výsledných hodnot je patrné, že změnou otáček se nezměnily tlakové poměry v ložisku. Minimálně se zmenšila únosnost ložiska. Z toho lze předpokládat, že změna otáček axiálního hydrostatického ložiska nemá podstatný vliv na únosnost ložiska a velikost statického tlaku.

### Změna otáček pro variantu 4

Zobrazení rychlostního pole na výstupu z axiálního hydrostatického ložiska při konstantních otáčkách  $n = 0,1 \text{ min}^{-1}$ , pro tloušťku mezery  $0,13 \text{ mm}$ , je na obr. 7.19. Grafický výstup pro otáčky  $n = 20 \text{ min}^{-1}$  je v příloze D. Rozložení rychlostního pole se u varianty 4 nezměnilo. Maximální velikost rychlosti se nachází v oblasti mazací kapsy a rovnoměrně klesá směrem k vyvíjecí drážce. Při postupném snižování otáček otočného stolu se minimálně snižuje rychlost proudění ve fluidní vrstvě. Při otáčkách  $n = 0,1 \text{ min}^{-1}$  klesne maximální rychlost na hodnotu  $4,1649 \text{ m.s}^{-1}$  z původní hodnoty  $4,17 \text{ m.s}^{-1}$  (otáčky

$n = 40 \text{ min}^{-1}$ ). Z toho lze předpokládat, že změna otáček axiálního hydrostatického ložiska nemá podstatný vliv na velikost rychlosti.



Obr. 7.19 Zobrazení rychlostního pole na výstupu v axiálním hydrostatickém ložisku, tloušťka mezery  $h = 0,13 \text{ mm}$

Rozsah velikosti rychlosti ( $n = 0,1 \text{ min}^{-1}$ ):

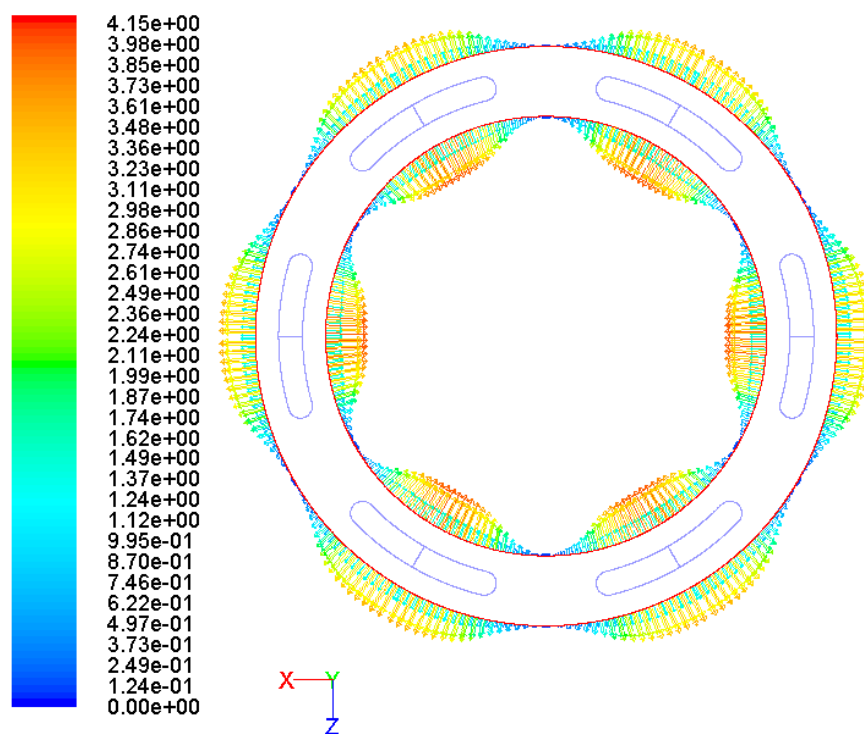
- ❖ maximální velikost rychlosti -  $u_{MAX} = 4,1649 \text{ m.s}^{-1}$
- ❖ minimální velikost rychlosti -  $u_{MIN} = 0,000163 \text{ m.s}^{-1}$

Rozsah velikosti rychlosti ( $n = 20 \text{ min}^{-1}$ ):

- ❖ maximální velikost rychlosti -  $u_{MAX} = 4,167 \text{ m.s}^{-1}$
- ❖ minimální velikost rychlosti -  $u_{MIN} = 0,00018 \text{ m.s}^{-1}$

### Změna otáček pro varianta 5

Rychlostního pole pro konstantní otáčky  $n = 0,1 \text{ min}^{-1}$  je zobrazeno na obr. 7.20. Grafický výstup pro otáčky  $n = 20 \text{ min}^{-1}$  je v příloze D. Rozložení rychlostního pole se u varianty 5 nezměnilo. Při snížení otáček otočného stolu se minimálně snížila rychlost proudění ve fluidní vrstvě. Změna otáček axiálního hydrostatického ložiska neměla pro danou variantu podstatný vliv na velikost rychlosti.



Obr. 7.20 Zobrazení rychlostního pole na výstupu v axiálním hydrostatickém ložisku, tloušťka mezery  $h = 0,13 \text{ mm}$

Rozsah velikosti rychlosti ( $n = 0,1 \text{ min}^{-1}$ ):

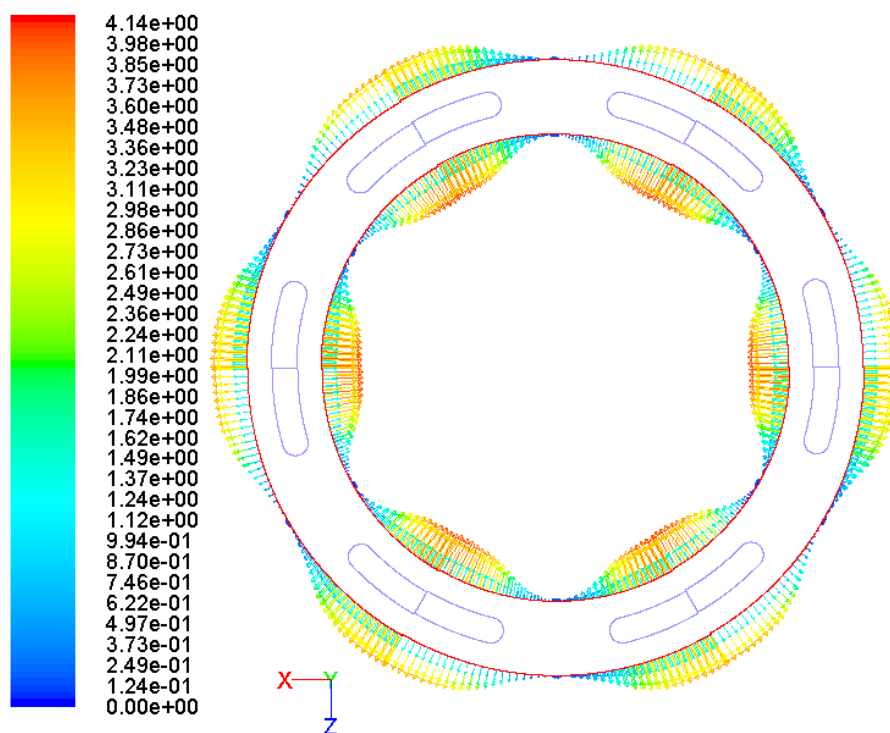
- ❖ maximální velikost rychlosti -  $u_{MAX} = 4,1451 \text{ m.s}^{-1}$
- ❖ minimální velikost rychlosti -  $u_{MIN} = 3,4637 \cdot 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$

Rozsah velikosti rychlosti ( $n = 20 \text{ min}^{-1}$ ):

- ❖ maximální velikost rychlosti -  $u_{MAX} = 4,15102 \text{ m.s}^{-1}$
- ❖ minimální velikost rychlosti -  $u_{MIN} = 3,9591 \cdot 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$

## Varianta 6

Rychlostního pole pro konstantní otáčky  $n = 0,1 \text{ min}^{-1}$  je zobrazeno na obr. 7.21. Grafický výstup pro otáčky  $n = 20 \text{ min}^{-1}$  je v příloze D. Rozložení rychlostního pole se u varianty 6 nezměnilo. Při snížení otáček otočného stolu se minimálně snížila rychlost proudění ve fluidní vrstvě. Z toho lze předpokládat, že změna otáček axiálního hydrostatického ložiska nemá podstatný vliv na velikost rychlosti.



Obr. 7.21 Zobrazení rychlostního pole na výstupu v axiálním hydrostatickém ložisku, tloušťka mezery  $h = 0,13 \text{ mm}$

Rozsah velikosti rychlosti ( $n = 0,1 \text{ min}^{-1}$ ):

- ❖ maximální velikost rychlosti -  $u_{MAX} = 4,14347 \text{ m.s}^{-1}$
- ❖ minimální velikost rychlosti -  $u_{MIN} = 0,000227 \text{ m.s}^{-1}$

Rozsah velikosti rychlosti ( $n = 20 \text{ min}^{-1}$ ):

- ❖ maximální velikost rychlosti -  $u_{MAX} = 4,1437 \text{ m.s}^{-1}$
- ❖ minimální velikost rychlosti -  $u_{MIN} = 0,000221 \text{ m.s}^{-1}$

## 8 ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá projekčním návrhem axiálního hydrostatického ložiska, které je součástí otočného stolu frézky DF 4600 CNC. Cílem práce bylo definování matematického modelu proudění ve fluidní vrstvě pomocí CFD programu Fluent a následnou aplikací na axiálním hydrostatickém ložisku.

V teoretické části diplomové práce se zabývám charakteristikou axiálního hydrostatického ložiska, které patří mezi kluzná ložiska. Zátěžná síla působí ve směru osy uložení. Mezi dvěma plochami je vytvořena souvislá vrstva maziva a vzniká tak kapalné tření. Pro bezpečný rozběh ložiska v oblasti kapalného tření se musí olej přehřívát na určitou teplotu. Ložiska mají velmi malý třecí odpor a teoreticky neomezenou trvanlivost, jsou bezhlučné s malou schopností tlumit vibrace. Vyznačují se vysokou únosností a jsou vhodné pro všechny obvodové rychlosti. Na rozdíl od hydrodynamických ložisek se hodí i pro velmi nízké obvodové rychlosti.

Hydraulický obvod axiálního hydrostatického ložiska se skládá z hydraulického agregátu a rozvodného bloku propojené potrubím (kap. 3). Zdrojem tlakové kapaliny je zubový hydrogenerátor, který rozvádí olej z nádrže do mazacích drážek. Tlak je rovnoměrně rozdělen do jednotlivých kapes pomocí škrtících ventilů se stabilizací tlakového pádu, které jsou součástí rozvodného bloku.

Pomocí programu Autodesk Inventor jsem vytvořil prostorový (3D) model axiálního kluzného ložiska. Výsledný model jsem vyexportoval do programu Gambit a použil k úpravě geometrie, vytvoření výpočetní sítě a definování okrajových podmínek. Následně jsem definoval odpovídající matematický model proudění v úzké mezeře. Pro numerickou simulaci proudění metodou konečných objemů jsem použil výkonný CFD program Fluent.

Na základě specifikace problematiky bylo definováno 7 variant řešení:

### **Varianta 1:**

Základní tvar a rozměry výpočetní oblasti byly vytvořeny podle výkresové dokumentace firmy Interfluid spol. s r.o. (kap. 7.1). Maximální průměr ložiska je  $\varnothing 1450$  mm a minimální  $\varnothing 1100$  mm. Ložisko má 6 mazacích kapes oddělené vyvíjecí drážkou. Uvažoval se původní hydraulický agregát s celkovým objemovým průtokem  $Q_{v1} = 35,2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$  a pracovním tlakem  $3 \text{ MPa}$ . Vyhodnocením matematického modelu jsem získal velikost statického tlaku ve fluidní vrstvě a únosnost axiálního hydrostatického

ložiska. První výpočet byl proveden pro tloušťku mezery  $h = 0,05 \text{ mm}$ . Statický tlak ( $50,3 \text{ MPa}$ ) mnohonásobně přesáhl daný pracovní tlak v ložisku ( $3 \text{ MPa}$ ). Kluzné ložisko při tloušťce mezery  $h = 0,1 \text{ mm}$  má vysokou únosnost ( $331\,704 \text{ N}$ ), ale má značný maximální statický tlak ( $7,9 \text{ MPa}$ ). Pro ostatní tloušťky mezery  $h = (0,11 - 0,15) \text{ mm}$  je patrná nízká únosnost axiálního hydrostatického ložiska. Varianta 1 axiálního hydrostatického ložiska s danými rozměry a velikostí hydraulického agregátu nedokáže vytvořit dostatečnou vůli pro otáčení desky otočného stolu, která by měla vyhovující únosnost. Řešením bylo zvolení hydraulického agregátu s větším výkonem.

#### **Varianta 2:**

Byl použit výkonnější hydraulický agregát s celkovým objemovým průtokem  $Q_{V2} = 50 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$  a pracovním tlakem  $4,5 \text{ MPa}$ . Základní rozměry a tvar axiálního hydrostatického ložiska byly zachovány (kap. 7.2). Matematický model byl vytvořen pro tloušťku fluidní vrstvy  $h = (0,1 - 0,15) \text{ mm}$ , jiná tloušťka mezery nemá pro zadané parametry význam. Při plném zatížení axiálního hydrostatického ložiska silou  $F = 300\,000 \text{ N}$  nepatrně vzroste střední statický tlak ( $\approx 6 \text{ MPa}$ ) nad hodnotu pracovního tlaku ( $4,5 \text{ MPa}$ ). Čerpadlo však dokáže vzniklé přetížení vyrovnat. Výkonnější hydraulický agregát vytvoří dostatečnou vůli pro otáčení desky otočného stolu při maximálním zatížení.

#### **Varianta 3:**

Definuje konstrukční úpravu mazací drážky axiálního hydrostatického ložiska (kap. 7.3). Změna se týká zmenšení šířky kapsy z  $80 \text{ mm}$  na  $40 \text{ mm}$ . Matematický model byl vytvořen pro tloušťku fluidní vrstvy  $h = (0,1 - 0,15) \text{ mm}$ . Zmenšením vstupní plochy kluzného ložiska došlo k nepatrnému zvýšení velikosti únosnosti ložiska (viz Tab. 7.3) při dané tloušťce mezery oproti variantě 2.

#### **Varianta 4:**

Definuje konstrukční úpravu mazací drážky axiálního hydrostatického ložiska (kap. 7.4). Změna se týká zmenšení šířky kapsy z  $80 \text{ mm}$  na  $60 \text{ mm}$ . Matematický model byl vytvořen pro tloušťku fluidní vrstvy  $h = (0,1 - 0,15) \text{ mm}$ . Zmenšením vstupní plochy kluzného ložiska došlo k nepatrnému zvýšení velikosti únosnosti ložiska (viz Tab. 7.4) při dané tloušťce mezery oproti variantě 2. Při tloušťce mezery  $h = 0,13 \text{ mm}$  je střední statický



tlak roven pracovnímu tlaku v hydraulickém agregátu ( $4,5 \text{ MPa}$ ). Vzniklé řešení bude bráno jako „referenční“ pro další konstrukční úpravy axiálního hydrostatického ložiska.

Porovnáním variant 2, 3, 4 lze vyhodnotit závislost tloušťky fluidní vrstvy na středním statickém tlaku a únosnosti ložiska (obr. 7.11 a 7.12). S rostoucí velikostí mezery klesá statický tlak. Varianta 2 má nejmenší tlak při dané tloušťce mezery a varianta 3 má tlak největší. Varianta 4 se pohybuje uprostřed obou předchozích variant. Jednotlivé varianty se liší velikostí vstupní plochy v kluzném ložisku a z toho lze usoudit, že s klesající velikostí plochy na vstupu roste velikost středního statického tlaku. Analogicky lze odvodit závislost změny tloušťky mezery na únosnosti axiálního hydrostatického ložiska. S rostoucí velikostí mezery klesá únosnost ložiska. S rostoucí velikostí vstupní plochy klesá únosnost ložiska při konstantní tloušťce mezery.

#### **Varianta 5:**

Definuje konstrukční úpravu vyvíjecí drážky axiálního hydrostatického ložiska (kap. 7.5). Tvar vyvíjecí drážky má obdélníkový průřez. Porovnáním s variantou 4 se nezměnila velikost středního statického tlaku na vstupu ( $4,47 \text{ MPa}$ ) a nepatrně se snížila únosnost ložiska z 219 974 N na 219 230 N. Konstrukční úpravou ložiska došlo ke snížení rychlosti kapaliny na výstupu v oblasti vyvíjecí drážky oproti variantě 4.

#### **Varianta 6:**

Definuje konstrukční úpravu vyvíjecí drážky axiálního hydrostatického ložiska (kap. 7.6). Vyvíjecí drážka má v řezu tvar poloviny paraboly. Porovnáním s variantou 4 se nezměnila velikost středního statického tlaku na vstupu ( $4,47 \text{ MPa}$ ) a nepatrně se snížila únosnost ložiska z 219 974 N na 219 368 N. Konstrukční úpravou ložiska došlo ke snížení rychlosti kapaliny na výstupu v oblasti vyvíjecí drážky oproti variantě 4.

Při porovnání variant 5 a 6 má varianta 5 menší rychlost kapaliny na výstupu v oblasti vyvíjecí drážky, a proto je výhodnější. S klesající rychlostí kapaliny v dané oblasti klesá vzájemná ovlivnitelnost mazacích kapes axiálního hydrostatického ložiska.

#### **Varianta 7:**

Definuje změnu otáček otočného stolu (kap. 7.7). U předchozích variant byly uvažovány konstantní otáčky  $n = 40 \text{ min}^{-1}$ . Pro pokrytí celého rozsahu byly uvažovány

otáčky  $n = 0,1 \text{ min}^{-1}$  a  $n = 20 \text{ min}^{-1}$ . Vyhodnocení změny otáček bylo provedeno pro varianty 4, 5 a 6, pro tloušťku mezery  $h = 0,13 \text{ mm}$ . Z výsledných hodnot je patrné, že se snížením otáček nezměnila velikost tlakového pole. Minimálně se zmenšila únosnost ložiska. Z toho lze předpokládat, že změna otáček axiálního hydrostatického ložiska nemá podstatný vliv na únosnost ložiska a velikost statického tlaku. U jednotlivých variant se minimálně snížila velikost rychlosti a lze z toho usoudit, že změna otáček nemá podstatný vliv na velikost rychlosti na výstupu z axiálního hydrostatického ložiska.

Porovnáním všech variant lze usoudit, že nejlepší vlastnosti má axiální hydrostatické ložisko s mazací kapsou o šířce 60 mm (varianta 4) a vyvíjecí drážkou obdélníkového průřezu (varianta 5).

Projekční úpravy axiálního hydrostatického ložiska by mohly pokračovat např. změnou počtu mazacích kapes a jejich tvarem, nebo změnou rozměrů průřezu vyvíjecí drážky.

## 9 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BEČKA, J.: *Tribologie*. Praha, 1997, 212 s. ISBN 80-01-01621-8
- [2] BLÁHA, J.; BRADA, K.: *Hydraulické stroje*. Praha, 1992, 752 s. ISBN 80-03-00665-1
- [3] BLAŠKOVÍČ, P.; BALLA J.; DZIMKO M.: *Tribológia*. Bratislava, 1990, 360 s.  
ISBN 80-05-00633-0
- [4] BLEJCHAŘ, T.: *Matematické modelování nestacionárního proudění, kavitace a akustických projevů v hydraulickém ventilu. Disertační práce, VŠB-TU Ostrava*, 2006, 99 s.
- [5] BOHÁČK, F.: *Části a mechanismy strojů II, Hřídel, tribologie, ložiska*. Brno, 1987, 215 s. ISBN 55-581-87
- [6] BOJKO, M.: *Návody do cvičení „Modelování proudění“ - FLUENT*. VŠB-TU Ostrava, 2008, 141 s. ISBN 978-80-248-1909-9
- [7] DRÁBKOVÁ S.: *Mechanika tekutin*. Ostrava, 2007, 257 s. ISBN 978-80-248-1508-4
- [8] JANALÍK, J.; ŠTÁVA, P.: *Mechanika tekutin*. Ostrava, 2002, 128 s.  
ISBN 80-248-0038-1
- [9] JANALÍK, J.: *Vybrané kapitoly z mechaniky tekutin*. Ostrava, 2008, 178 s.  
ISBN 978-80-248-1910-5
- [10] KOZUBKOVÁ, M.: *Modelování proudění – Fluent I*. VŠB-TU Ostrava, 2008, 142 s.  
Dostupný z WWW: <<http://www.338.vsb.cz>>.
- [11] PAVLOK, P.: *Hydraulické prvky a systémy I. Kapaliny v hydraulických mechanismech, hydrostatické převodníky*. Ostrava, 1999, 158 s. ISBN 80-7078-620-5
- [12] ŠTÁVA, P.; PAVLOK, P.: *Mazací technika*. Ostrava, 2006, 76 s. ISBN 80-248-100-X
- [13] ŠTĚPINA, V.; VESELÝ, V.: *Maziva v tribologii*. Bratislava, 1985, 408 s.

ISBN 71-059-85

[14] VINŠ, J.: *Kluzná ložiska*. Praha, 1971, 376 s. ISBN 04-235-71

[15] FLUENT: *Fluent 6.3 - User's guide* Fluent Inc. 2006. VŠB-TU Ostrava.

Dostupný z WWW: <<http://spc.vsb.cz>>.

[16] Podklady firmy Interfluid, spol. s r.o.

[17] PARAMO, a.s. *Katalog produktů* [online]. [cit. 2010-1-2]

Dostupný z WWW: <<http://www.paramo.cz>>.

## 10 SEZNAM PŘÍLOH

**Příloha A:** Varianta 2 (kap. 7.2). Tlakové pole ve vyhodnocovací rovině axiálního hydrostatického ložiska, tloušťka mezery 0.1 mm, 0.11 mm, 0.12 mm, 0.14 mm, 0.15 mm.

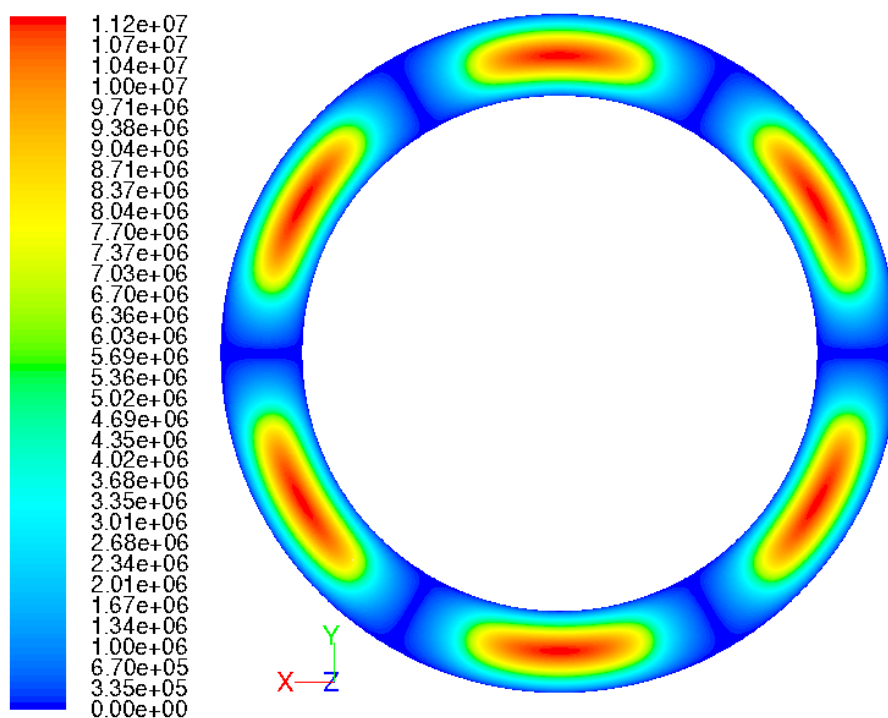
**Příloha B:** Varianta 3 (kap. 7.3). Tlakové pole ve vyhodnocovací rovině axiálního hydrostatického ložiska, tloušťka mezery 0.1 mm, 0.11 mm, 0.12 mm, 0.14 mm, 0.15 mm.

**Příloha C:** Varianta 4 (kap. 7.4). Tlakové pole ve vyhodnocovací rovině axiálního hydrostatického ložiska, tloušťka mezery 0.1 mm, 0.11 mm, 0.12 mm, 0.14 mm, 0.15 mm.

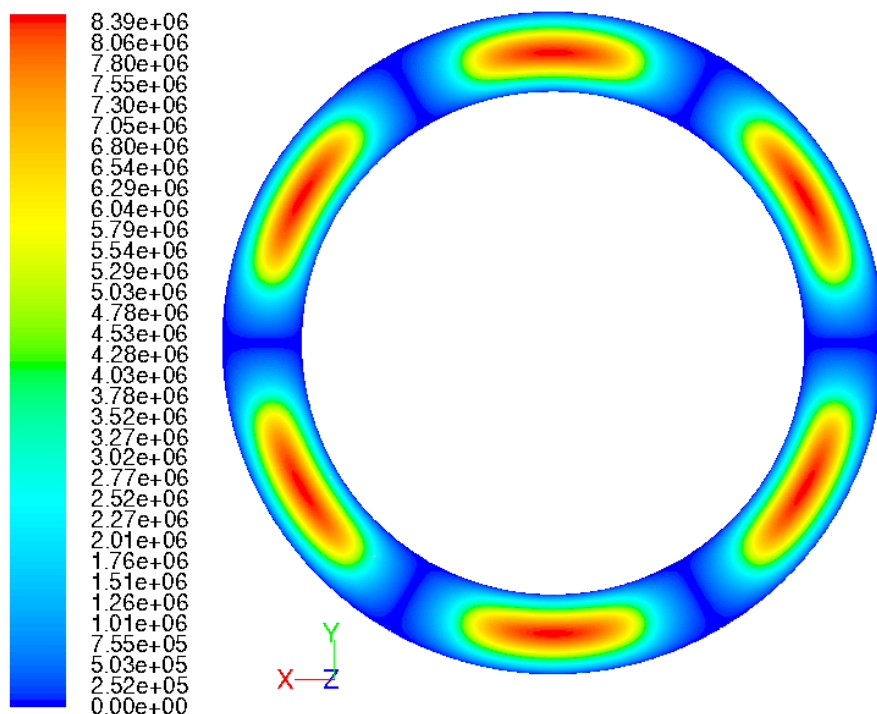
**Příloha D:** Varianta 7 (kap. 7.7). Rychlostní pole ve vyhodnocovací rovině axiálního hydrostatického ložiska, otáčky  $n = 20 \text{ min}^{-1}$ .

**CD** 1x

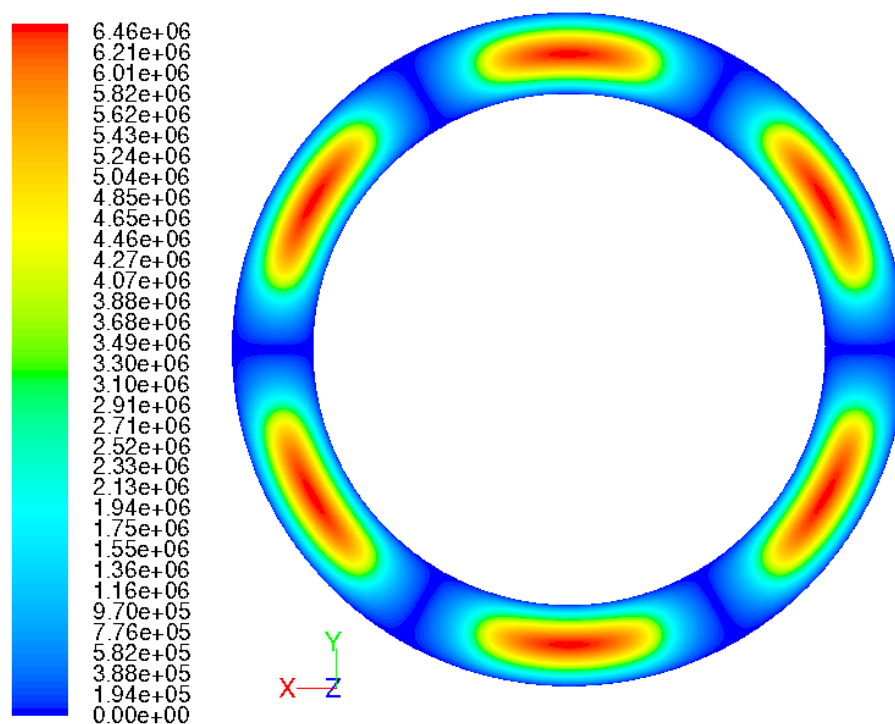
## Příloha A: Varianta 2 (kap. 7.2)



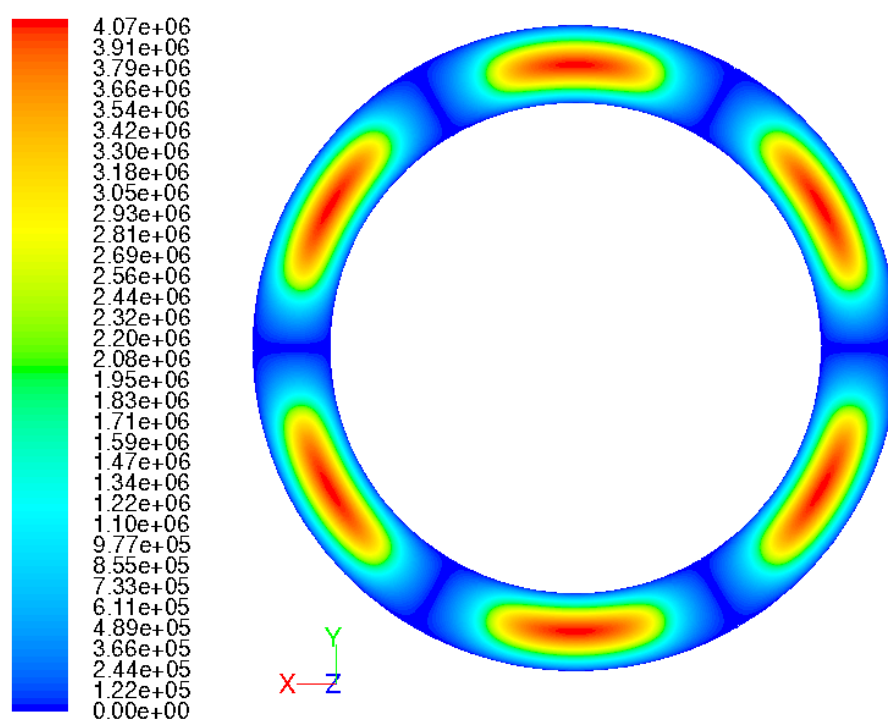
Obr. 10.1 Tlakové pole ve vyhodnocovací rovině axiálního hydrostatického ložiska, tloušťka mezery 0,1 mm



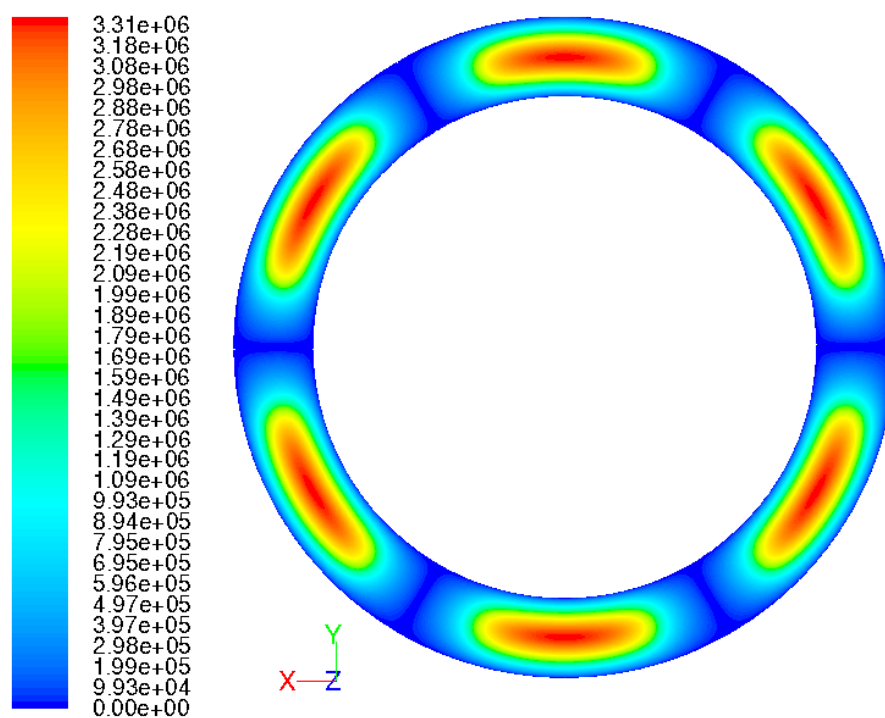
Obr. 10.2 Tlakové pole ve vyhodnocovací rovině axiálního hydrostatického ložiska, tloušťka mezery 0,11 mm



Obr. 10.3 Tlakové pole ve vyhodnocovací rovině axiálního hydrostatického ložiska, tloušťka mezery 0,12 mm

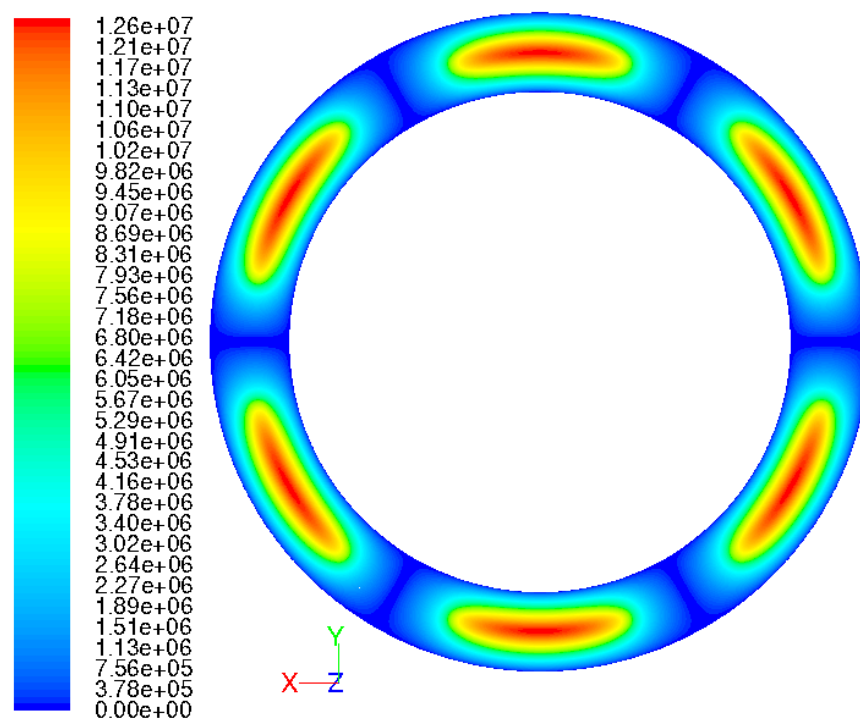


Obr. 10.4 Tlakové pole ve vyhodnocovací rovině axiálního hydrostatického ložiska, tloušťka mezery 0,14 mm

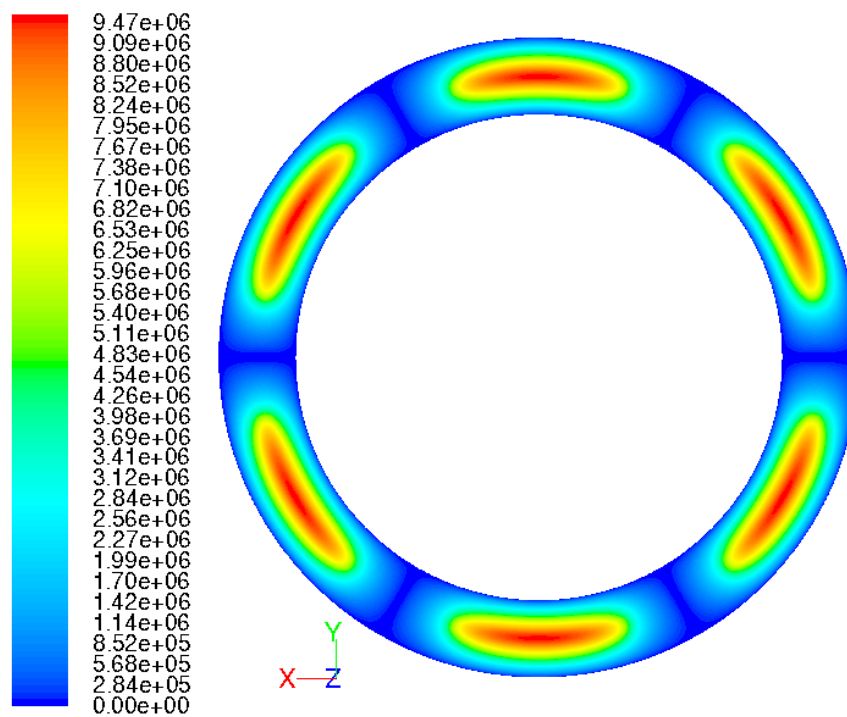


Obr. 10.5 Tlakové pole ve vyhodnocovací rovině axiálního hydrostatického ložiska, tloušťka mezery 0,15 mm

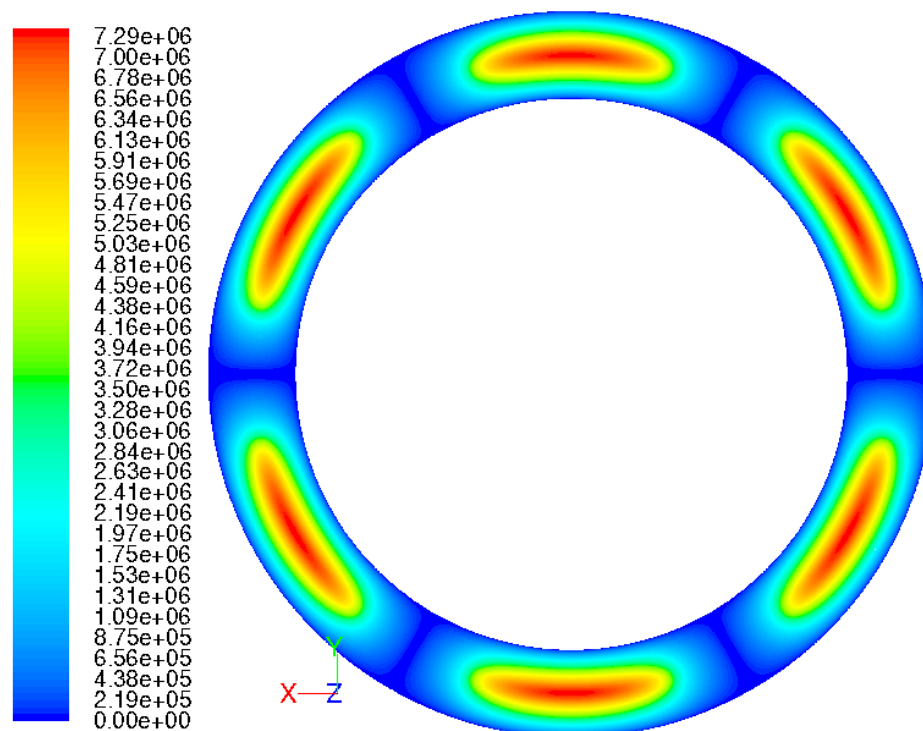
## Příloha B: Varianta 3 (kap. 7.3)



Obr. 10.6 Tlakové pole ve vyhodnocovací rovině axiálního hydrostatického ložiska, tloušťka mezery 0,1 mm

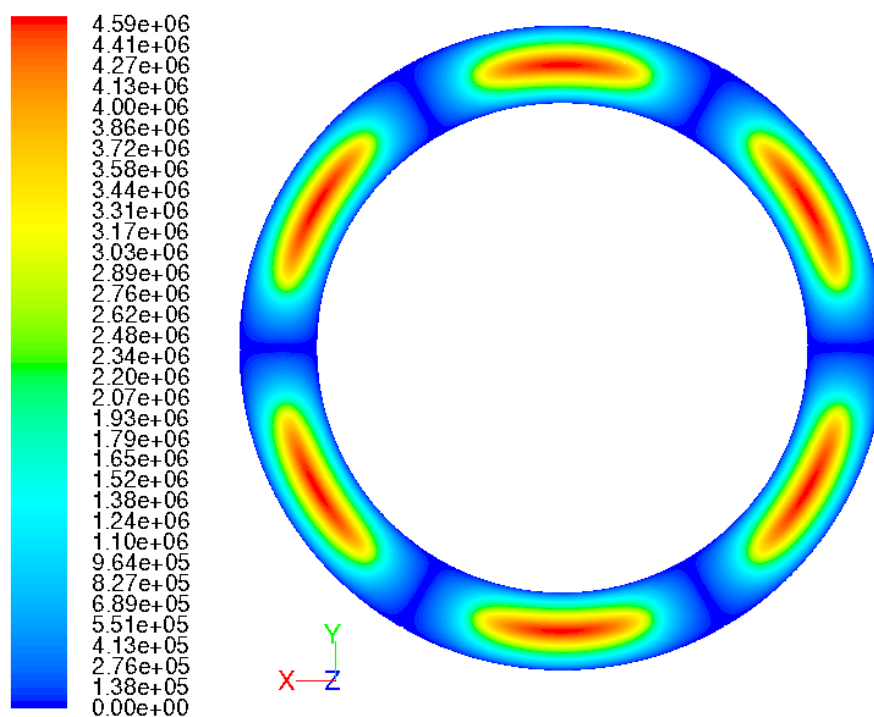


Obr. 10.7 Tlakové pole ve vyhodnocovací rovině axiálního hydrostatického ložiska, tloušťka mezery 0,11 mm

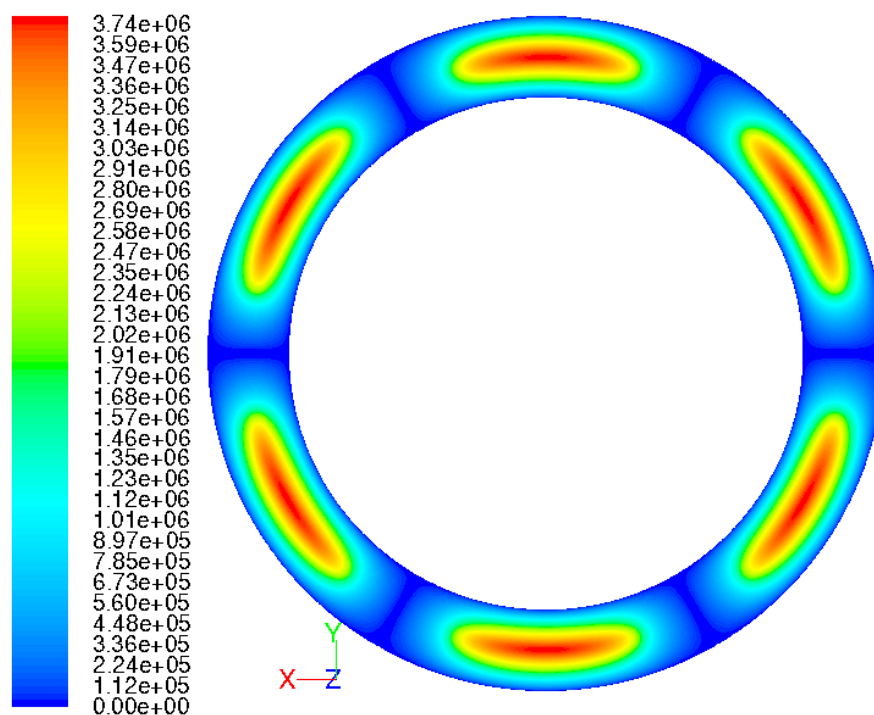


Obr. 10.8 Tlakové pole ve vyhodnocovací rovině axiálního hydrostatického ložiska, tloušťka mezery 0,12 mm



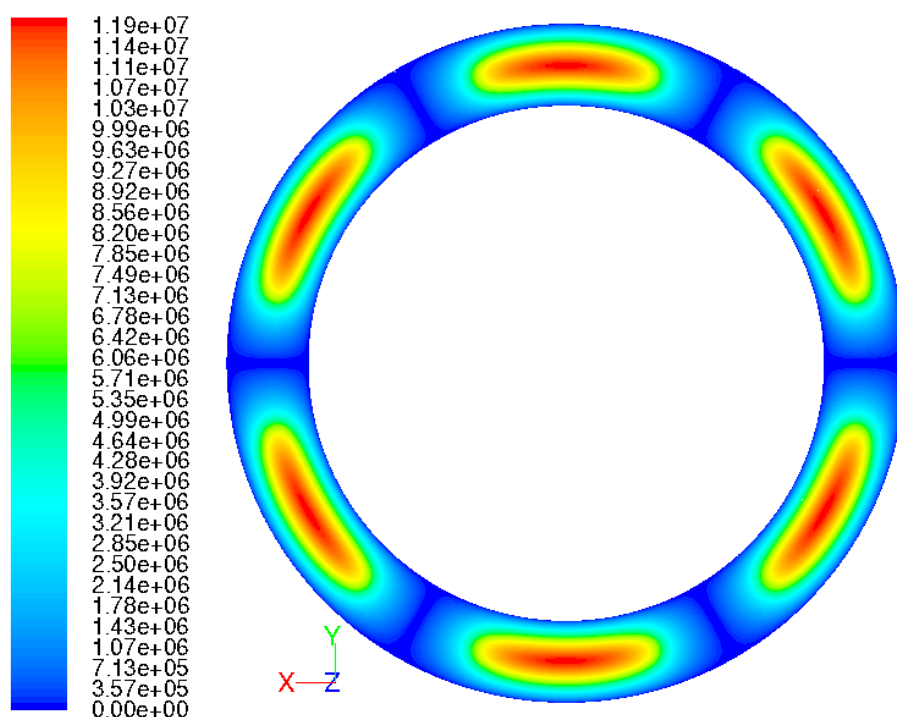


Obr. 10.9 Tlakové pole ve vyhodnocovací rovině axiálního hydrostatického ložiska, tloušťka mezery 0,14 mm

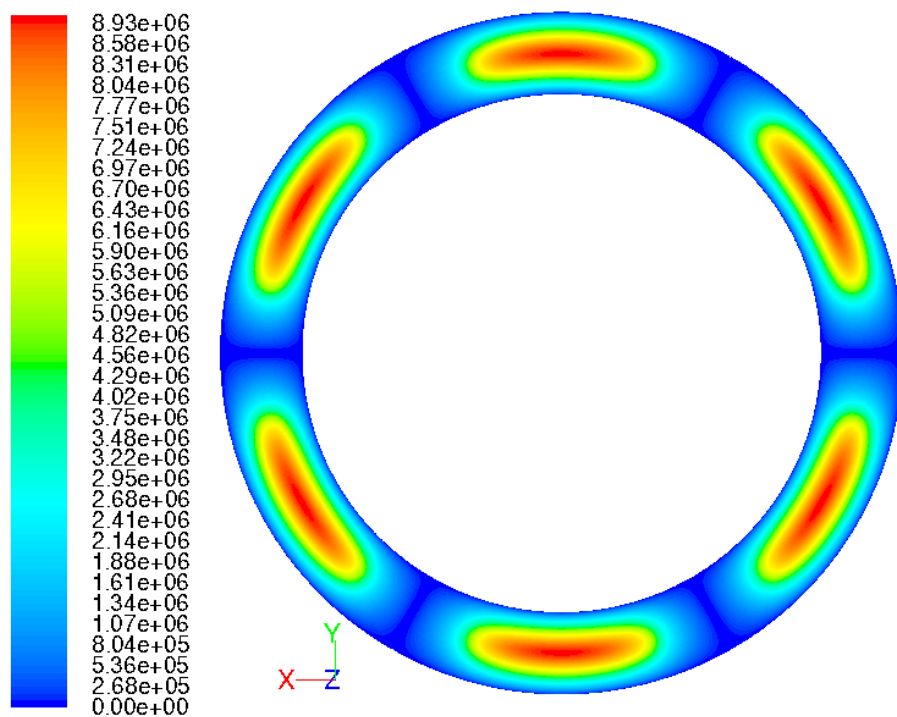


Obr. 10.10 Tlakové pole ve vyhodnocovací rovině axiálního hydrostatického ložiska, tloušťka mezery 0,15 mm

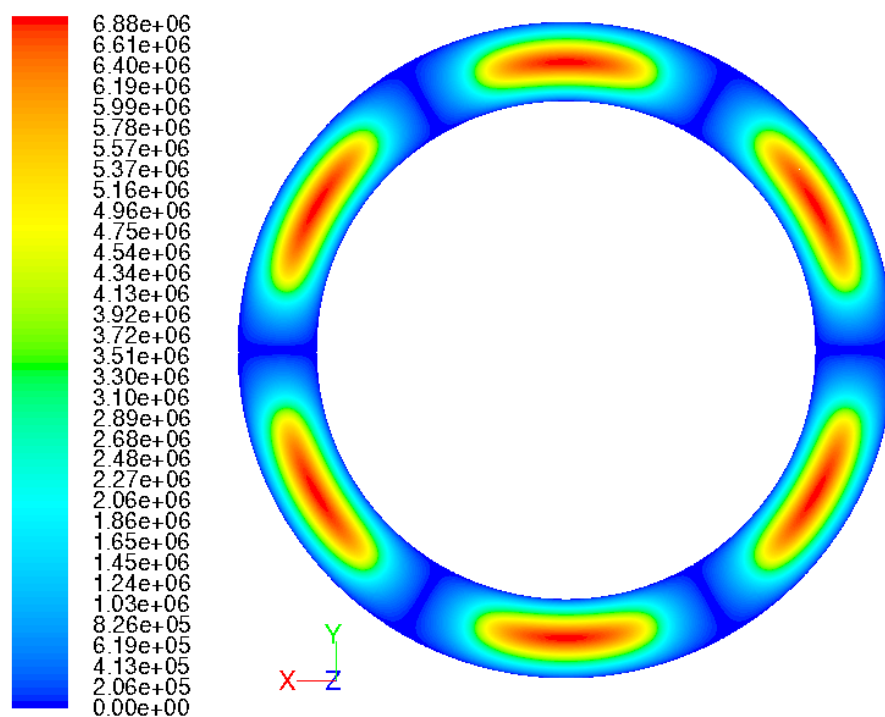
**Příloha C: Varianta 4 (kap. 7.4)**



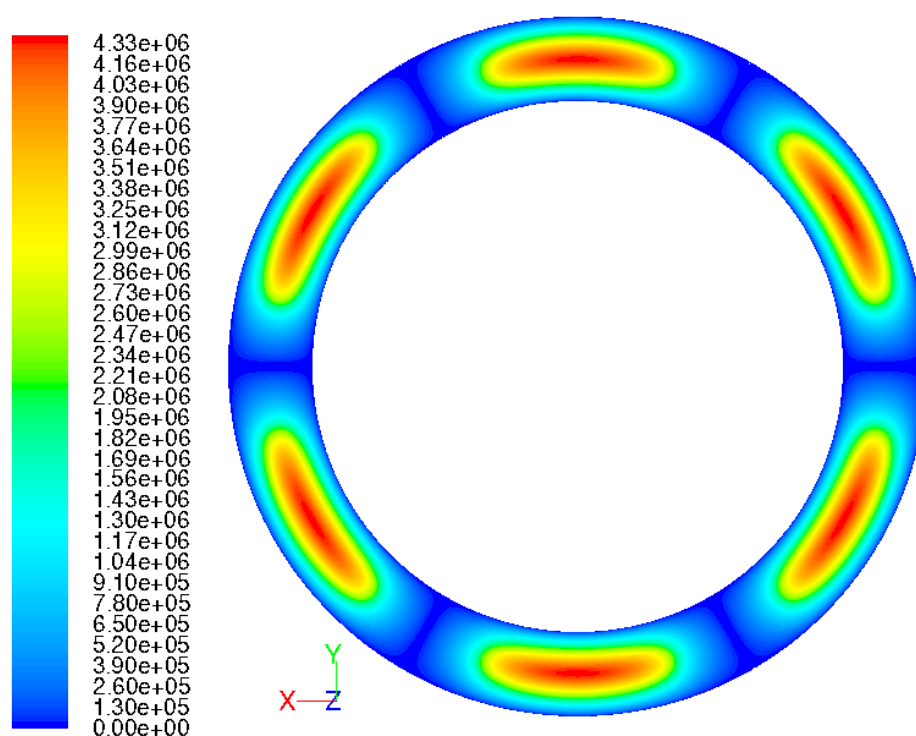
*Obr. 10.11 Tlakové pole ve vyhodnocovací rovině axiálního hydrostatického ložiska, tloušťka mezery 0,1 mm*



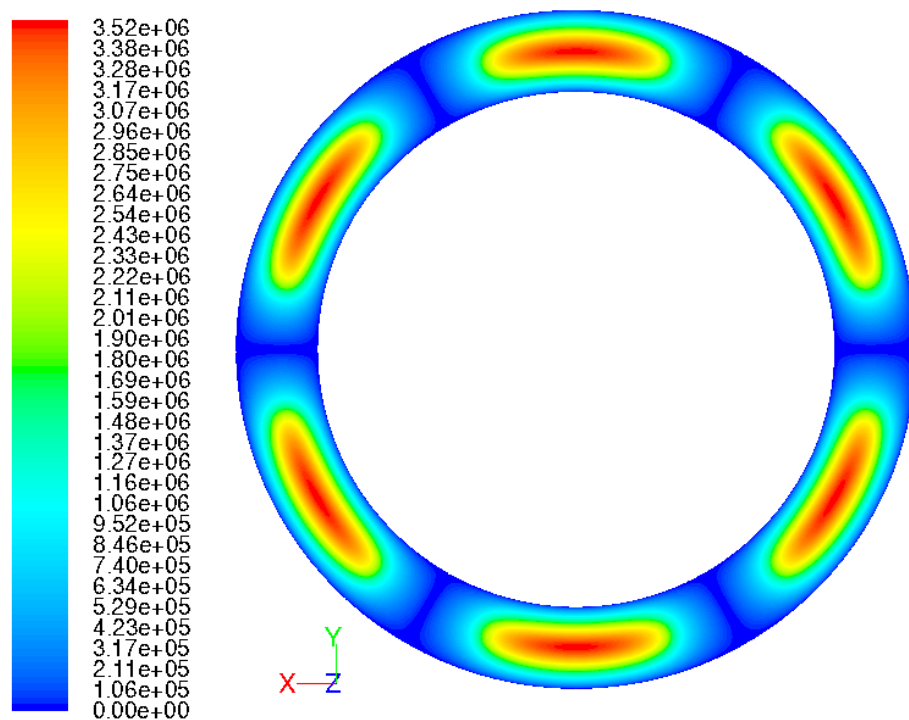
*Obr. 10.12 Tlakové pole ve vyhodnocovací rovině axiálního hydrostatického ložiska, tloušťka mezery 0,11 mm*



Obr. 10.13 Tlakové pole ve vyhodnocovací rovině axiálního hydrostatického ložiska, tloušťka mezery 0,12 mm

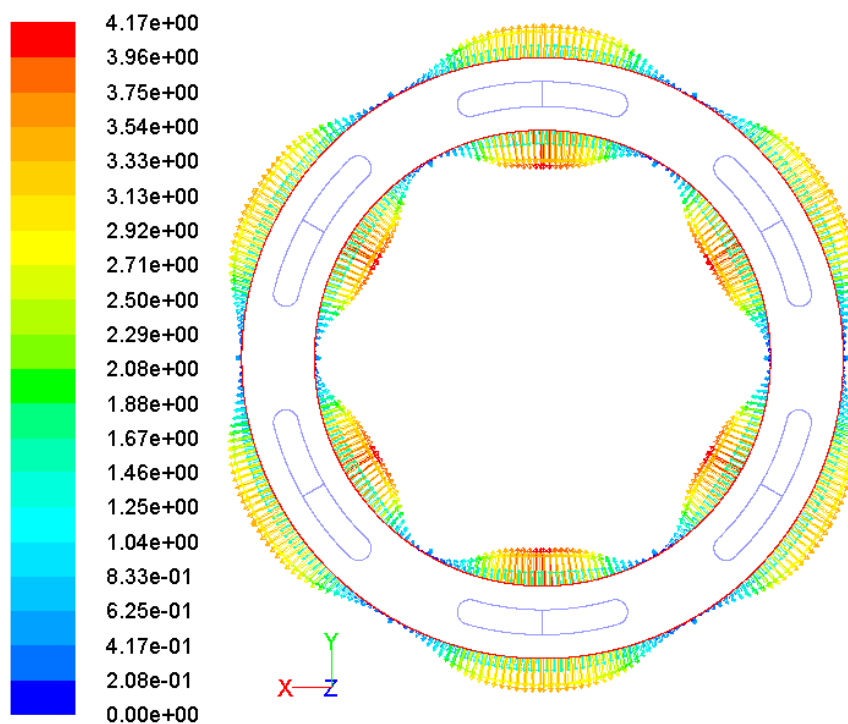


Obr. 10.14 Tlakové pole ve vyhodnocovací rovině axiálního hydrostatického ložiska, tloušťka mezery 0,14 mm

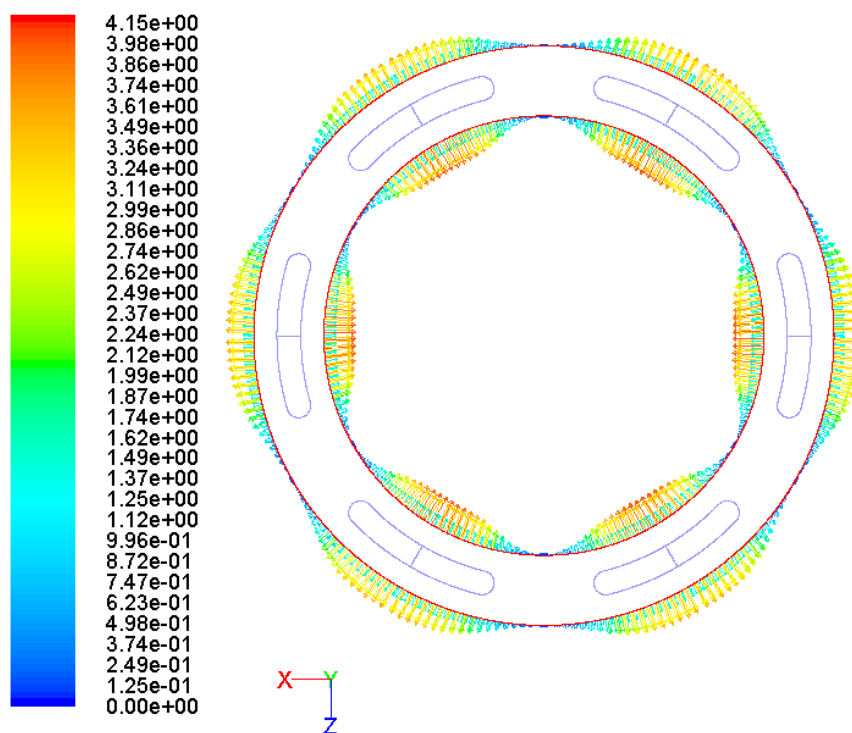


Obr. 10.15 Tlakové pole ve vyhodnocovací rovině axiálního hydrostatického ložiska, tloušťka mezery 0,15 mm

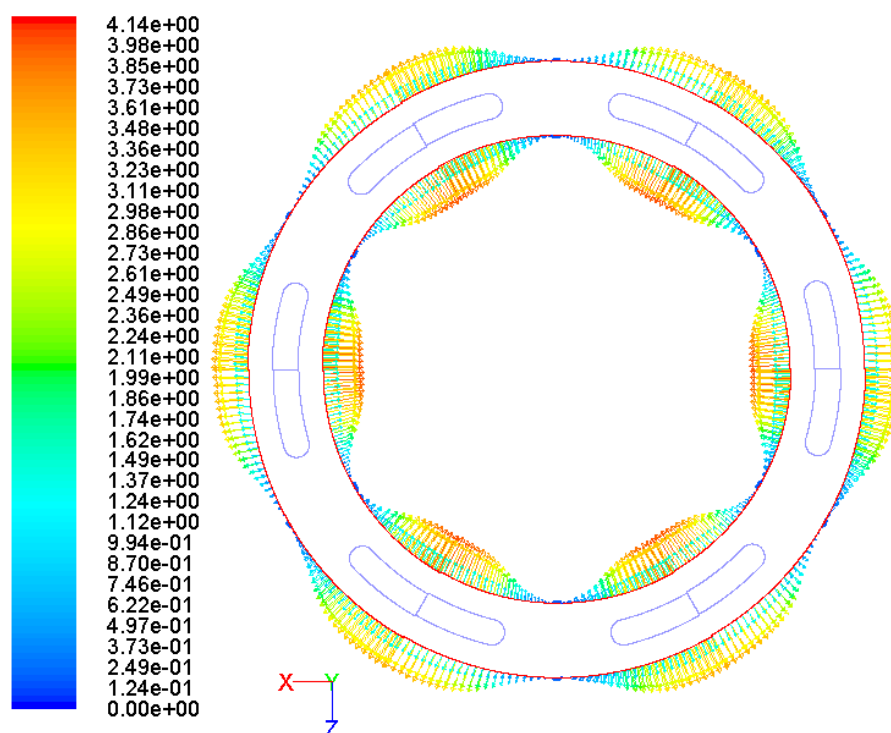
#### Příloha D: Varianta 7 (kap. 7.7)



Obr. 10.16 Rychlostní pole ve vyhodnocovací rovině axiálního hydrostatického ložiska, otáčky  $n = 20 \text{ min}^{-1}$  pro variantu 4



Obr. 10.17 Rychlostní pole ve vyhodnocovací rovině axiálního hydrostatického ložiska, otáčky  $n = 20 \text{ min}^{-1}$  pro variantu 5



Obr. 10.18 Rychlostní pole ve vyhodnocovací rovině axiálního hydrostatického ložiska, otáčky  $n = 20 \text{ min}^{-1}$  pro variantu 6